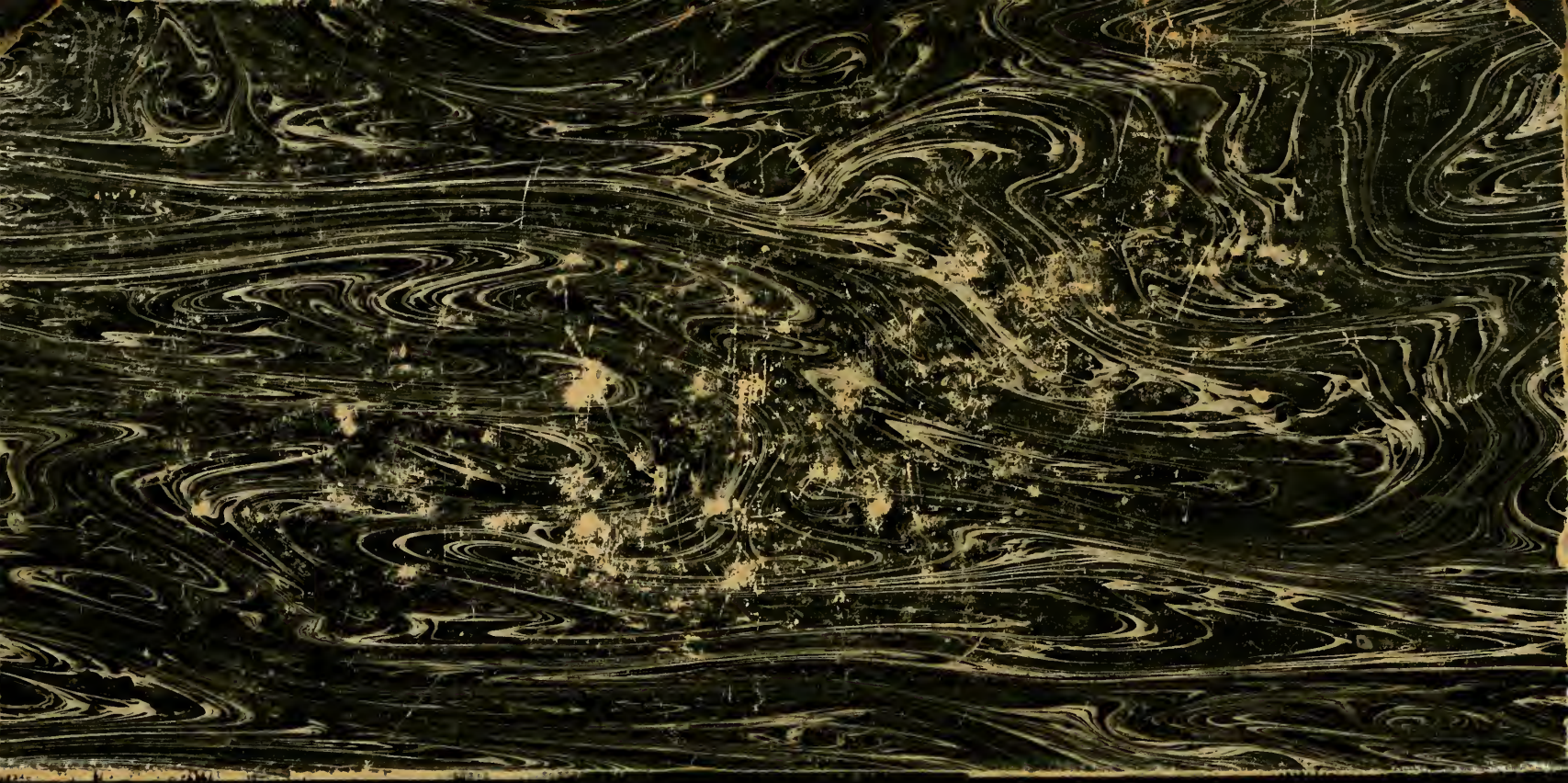


Library of

Wellesley College.

NON MINISTRARI SED MINISTRARE.

Purchased from
The Horsford Fund.

No

Vacuumed 10-82

Die physischen Gestalten
in Ruhe und im stationären Zustand

Die physischen Gestalten in Ruhe und im stationären Zustand

Eine naturphilosophische Untersuchung

Von

Wolfgang Köhler

Mit fünf Abbildungen

Druck und Verlag von Friedr. Vieweg & Sohn, Braunschweig

1920

Alle Rechte,
namentlich das Recht der Übersetzung in fremde Sprachen, vorbehalten.

Copyright, 1920, by Friedr. Vieweg & Sohn,
Braunschweig, Germany.

112443

SCIENCE
Q
125
A6

Printed in Germany

Carl Stumpf

gewidmet

Vorwort.

Den ersten Anlaß zu dieser Untersuchung gaben Beobachtungen über das Verhalten von Wirbeltieren gegenüber ihrer Umgebung (3. und 4. Schrift der Anthropoidenstation auf Teneriffa, Berichte der Preußischen Akademie der Wissenschaften 1917 und 1918). Da aber die Fragestellung, zu welcher ich so geführt wurde, einen ganz allgemeinen Sinn hat, so verlor die besondere und etwas zufällige Anregung von der Tierpsychologie her im Verlauf des Gedankenfortschrittes an Bedeutung, und aus der Darstellung des Ergebnisses ist sie, ich glaube mit Recht, getilgt worden.

Wo die Untersuchung physikalische Gegenstände betrifft, habe ich überall vor der naturphilosophischen Betrachtung kurz an die elementaren physikalischen Theoreme erinnert. — Denk- und Sprechart der höheren Mathematik mußten in Einzelnachweisen hier und da angewandt werden, doch dürften auch Leser, denen diese Methoden fremd sind, ein einigermaßen ausreichendes Gesamtbild des Gemeinten erhalten.

Ich bedaure sehr, daß die Gedanken anderer über das untersuchte Gebiet weit weniger Erwähnung finden, als angemessen wäre. In den letzten Jahren ist viel geistige Arbeit auf das Gestaltproblem verwandt worden; aber nur einzelne Schriften ähnlicher Grundrichtung konnte ich anführen und berücksichtigen, da die übrigen mir nicht zugänglich waren.

Der Preußischen Akademie der Wissenschaften, welche diese Forschungen ermöglicht und überdies einen Beitrag zur Bestreitung der Druckkosten bewilligt hat, spreche ich aufrichtigen Dank aus.

Teneriffa, im Mai 1919.

Wolfgang Köhler.

Inhaltsübersicht.

Seite

Vorwort VII
Inhaltsübersicht VIII
Einleitung für Philosophen und Biologen IX
Einleitung für Physiker XVI

Abschnitt I. Ableitung eines ersten physischen Gestaltfaktors.

Erstes Kapitel. Die charakteristische Eigenschaft stationär erregter somatischer Felder 1
Zweites Kapitel. Das elektrische Verhalten inhomogen erregter Felder 14
Drittes Kapitel. Der erste physische Gestaltfaktor 28

Abschnitt II. Die elektrostatischen Strukturen.

Erstes Kapitel. „Undverbindungen“ und „Physikalische Systeme“ . . . 41
Zweites Kapitel. Die Ladungsstrukturen 54
Drittes Kapitel. Die Feldstrukturen 70
Viertes Kapitel. Verifikation an der experimentellen Methodik 79
Fünftes Kapitel. Verifikation an der theoretischen Methodik 85

Abschnitt III. Die physischen Gestalten in Ruhe und im stationären Zustand.

Erstes Kapitel. Die starken Gestalten 114
Zweites Kapitel. Die schwachen Gestalten 126
Drittes Kapitel. Die stationären elektrischen Ströme 133
Viertes Kapitel. Übersicht 153

Abschnitt IV. Erste Anwendung auf psychophysische Gestalten.

Erstes Kapitel. „Denn was innen, das ist außen“ 173
Zweites Kapitel. Zur Physik der optischen Gestalten 195
Drittes Kapitel. Das Webersche Gesetz. 211
Viertes Kapitel. Die Bedingungen psychophysischer Raumstruktur . . 227
Fünftes Kapitel. Die Richtung auf Prägnanz der Struktur 248

Einleitung für Philosophen und Biologen[1]).

„Gestalten" nennt man nach v. Ehrenfels diejenigen psychischen Zustände und Vorgänge, deren charakteristische Eigenschaften und Wirkungen aus artgleichen Eigenschaften und Wirkungen ihrer sogenannten Teile nicht zusammensetzbar sind. So findet man Raumgestalten, die den Namen für alle hergaben, elementareren visuellen Gebilden, so Melodien Tönen, und intellektuelle Verbände ihrem Material an spezifischen Eigenschaften weit überlegen. Denn wenn vorausgesetzt wird, daß örtliche Farbempfindungen, daß einzelne Tonempfindungen und daß Bedeutungen einzelner Worte als „Teile" der Raumgestalten, der Melodien und der Gedanken anzusehen sind, dann enthalten der bestimmte Eindruck einer gesehenen Figur, der spezifische Charakter irgendeines musikalischen Motivs und der Sinn eines verständigen Satzes sicherlich mehr als die Summe der betreffenden Farbenpunkte, Tonempfindungen und Wortbedeutungen. Dieselbe Raumgestalt kann in anderen Farben und an anderen Orten des Gesichtsfeldes, dasselbe musikalische Motiv in anderen Tonhöhen vorgeführt werden; also machen solche „absoluten Elemente" die spezifische Natur der Gesamtgebilde nicht aus; hält man sich den Sinn eines Satzes im ganzen vor, danach die Bedeutungen seiner einzelnen Worte in Isolierung, so wird im zweiten Fall eben der Bedeutungszusammenhang vermißt, welchen wir als Sinn des Satzes bezeichnen. — Solche Gebilde, die als ganze spezifische Eigenschaften haben und deshalb mit gutem Recht als Einheiten aufzufassen sind, meinen wir also mit dem Namen „Gestalten". Der Begriff ist jung und seine Definition dementsprechend noch reichlich unbestimmt, aber seine wissenschaftliche Fruchtbarkeit scheint trotzdem schon heute wesentlich größer als die der meisten Momente, die man früher für fundamental im psychischen Leben gehalten hatte. Alle diejenigen Forschungen, welche gegenwärtig von den verschiedensten Seiten her und auf den verschiedensten Einzel-

[1]) Es war nicht möglich, die Fragestellung dieser Schrift in einem Gedankengang zu entwickeln, der zugleich für Philosophen, Biologen und Physiker gepaßt hätte. Die Voraussetzungen sind in den einzelnen Wissenschaften gar zu verschieden. So mußte ich mich entschließen, einer Einführung für Philosophen und Biologen eine zweite für Physiker folgen zu lassen (vgl. unten S. XVI).

gebieten immer auf diesen Zentralbegriff hinführen, müssen zur Folge haben, daß die charakteristischen Züge der Gestalten allmählich klarer hervortreten; und so kann rein vorwärts gerichtete psychologische Untersuchung den merkwürdigen Typus, der sich überall in den Erscheinungen andeutet, zu einem Gegenstand von scharf bestimmten Eigenschaften, wohlbekannten Gesetzen und verständlich abgegrenzten Untergattungen machen.

Wäre Psychologie die erste Erfahrungswissenschaft, die der Mensch gewinnen möchte, und sein Denken frei von sonst ausgebildeten Grundvorstellungen, so müßten wir diesen Weg des unbekümmerten Vorwärtsschreitens durch weitere Empirie als den vorläufig einzigen ansehen, auf dem das neue Denkgebilde zu größerer Konkretheit fortentwickelt werden könnte. Da dies nicht der Fall ist, da vielmehr andere Erfahrungswissenschaften vor der Psychologie einen Entwicklungsvorsprung von Jahrhunderten haben, und wir allein deshalb schon in jedem Augenblick mit Kategorien weit größeren Alters denken, so eröffnet sich ein zweiter Weg, den Gestaltbegriff zu festigen. Dieser Weg ist rückwärts gerichtet: Wenn etwas von den Zügen der neuen psychologischen Grundvorstellung doch schon unter älteren Denkgegenständen vorkommen sollte, so wollen wir es suchen, und falls wir es finden, die Verbindung vom einen Gebiet zum anderen herstellen. Gibt es dergleichen nicht, dann erst bleiben wir ganz auf den empirischen Weg nach vorwärts angewiesen und müssen uns zugleich mit der unbefriedigenden Idee vertraut machen, daß das Erfahrbare kein durchweg in sich geschlossenes System bildet, daß an dieser Stelle ein Sprung klafft und der fundamentalen psychologischen Kategorie ihr Verwandtes in älterem Denken nirgends entspricht.

Eine weit verbreitete Vorstellungsweise besagt, daß in der Tat dieser Weg nach rückwärts nicht gangbar ist. Die einen, wohl aus philosophischen Voraussetzungen geneigt, dem Seelenleben Gesetze nach Möglichkeit sui generis zuzuschreiben, weisen auf Gestalten hin und sagen: Seht, wie die produktive Kraft der Seele Gebilde gänzlich neuer Art schafft, denen aus keinem Gebiet der sonst so mechanischen Natur etwas Ähnliches an die Seite zu stellen wäre. Die anderen, gründlich überzeugt, daß in sich einstimmige Vernunft das System älterer Denkgegenstände aufgebaut hat, verlangen, daß sich neuere Vorstellungen den gewohnten angliedern oder unterordnen, und da sie keine Möglichkeit erblicken, die angeblichen Eigenschaften von Gestalten mit schon bewährten Kategorien zu

verbinden, so halten sie sich überhaupt einer Neuerung vorsichtig fern, die ihrer Meinung nach Mißdeutung unsicherer Empirie und am Ende eine vorübergehende Mode sein könnte, wie es deren in der Psychologie schon vorher gegeben hat.

In der Tat verspüren selbst diejenigen, welche bereits gewohnt sind, mit dem Begriff der Gestalten als dem von etwas psychisch vollkommen Realem zu arbeiten, bisweilen wohl eine leichte Hemmung bei diesem Verfahren, das ein Umgehen mit empirisch nur eben und durch theoretisches Fundament noch gar nicht legitimierten Gebilden bedeutet. Unzweifelhaft ist es dem Menschen nicht recht natürlich, Wissenschaft von Bewußtsein und psychischem Geschehen zu machen. Selbst der eigenen Beobachtung fühlt er sich auf diesem Feld nicht sicher, und wenn er deshalb Fremdartiges findet, so wendet er sich gern den Wissenschaften von der Außenwelt und vorzüglich denen von der unbelebten Natur zu, wo der Boden von lange her fester ist, um hier eine Kontrolle und allenfalls eine analogische Bestätigung zu suchen. Nicht allein die Möglichkeit, auch das allerstärkste Bedürfnis ergibt sich, nach Gestalten oder wenigstens ihnen Ähnlichem einmal nicht in der flüchtigen Unsicherheit der beobachteten Erlebnisse, sondern in den festen Formen der anorganischen Naturvorgänge zu forschen, und womöglich zugunsten der Gestalttheorie jene Klarheit und Bestimmtheit auszunutzen, zu der es der Mensch beim Beobachten und Denken von physischen Dingen so viel eher gebracht hat als in der Psychologie.

Indessen wirkt ein erster Blick auf die Naturwissenschaften entmutigend genug. Ihr stolzestes Prädikat, das der Exaktheit, scheint von vornherein denjenigen abzuweisen, welcher auf ihrem Gebiet nach in gewissem Sinn „zusammengesetzten“ und doch durch eine „spezifische Einheit“ charakterisierten Gebilden sucht. Verlangt er überdies, daß diese Einheiten für Geschehen und Zustände maßgebende Eigenschaften und Wirkungen aufweisen sollen noch außer denen der sämtlichen Teile zusammengenommen, daß also „Ganze“ unter den Gegenständen naturwissenschaftlicher Forschung vorkommen, die in solcher Weise „mehr sind als die Summe ihrer Teile“, so hat er wohl bereits das Vorgefühl, den Grundlagen der exakten Wissenschaften geradezu Widersprechendes zu fordern.

Für kurze Frist könnte die Chemie etwas wie eine Hoffnung erwecken, da doch die Verbindung KCN z. B. wie eine Einheit der geforderten Art aussieht und markante Eigenschaften besitzt,

welche man an den Elementen Kalium, Kohlenstoff und Stickstoff so gewiß nicht findet. Mancher hat an dergleichen als an eine Analogie gedacht und hat doch wieder nur ein ungefähres Bild darin gefunden, weil einerseits manche von den Eigenschaften wichtigster psychischer Gestalten sich an chemischen Verbindungen gar nicht aufweisen lassen, und auf der anderen Seite nach so vielen Wundern naturwissenschaftlicher Entdeckung doch auch das eine noch eintreten könnte, daß die scheinbare Neubildung, vorläufig anerkannt von der kaum 100 Jahre alten Chemie, im Fortschreiten der Physik und physikalischen Chemie sich eines Tages auf physikalische Grundvorstellungen reduzierte. Wenn also die Physik keine Gestalten kennt, werden wir nie sicher sein, wie lange noch die Chemie ihnen wenigstens einigermaßen Ähnliches bietet. Auf jeden Fall ist der Begriff der chemischen Verbindungen theoretisch selbst noch zu wenig geklärt und zu schwankend, als daß jene Analogie mit Gestalten uns zu einer hinreichend festen Bestimmung der psychologischen Kategorie verhelfen könnte.

Damit stände es freilich auf physikalischem Gebiet anders, und wer den Mut bei einem schnellen Überblick über die Denkgegenstände und die Grundanschauungen der Physik noch nicht verliert, der könnte allenfalls doch hoffen, in systematischer Durchprüfung der physikalischen Einzelgebiete sowohl wie der immer wiederkehrenden Hauptbegriffe dieser Wissenschaft irgend etwas zu finden, was jedenfalls in mancher Hinsicht schon sehr stark durchgedacht wäre, wenn es nur auch Gestalteigenschaften hätte. Aber die Physik ist so groß und sieht, wenn man noch gar keinen Leitfaden besitzt, überall so wenig gestaltmäßig aus, daß man bald ermüdet. Auch durch folgende Erwägung schon wird man von diesem systematischen Wege des Forschens abgebracht: Selbst wenn Gestalten in der Physik vorkommen, ist doch von vornherein sicher, daß die Physiker bisher keinen Anlaß gefunden haben, die betreffenden Fälle als etwas Besonderes aus dem Reichtum des ganzen Gebietes herauszusondern; denn sonst würden wir wohl sofort auf dieses Sondergebiet aufmerksam werden, oder vielmehr, das wäre längst zum Besten der Psychologie geschehen, und wir brauchten nicht erst zu suchen. Also würde weder die geläufige und durch so viele Erfolge bewährte Betrachtungsweise, mit welcher der Physiker auf sein eigenes Forschungsgebiet sieht, noch die Terminologie, die sich in der Physik ausgebildet hat, von dem, was wir suchen, ohne weiteres Zeugnis ablegen. Ohne einen speziellen leitenden

Gesichtspunkt würden wir die anorganische Natur ja doch notwendig eben mit der Arbeitsweise und der Terminologie der Physik behandeln, und da diese das Gesuchte scheinbar nirgends andeuten, so wäre nur wahrscheinlich, daß selbst Gestalten, die zum Material des Physikers gehörten, uns gänzlich entgehen müßten: Denken und Sprache der Naturwissenschaft sind schon nach anderen Gesichtspunkten festgelegt und würden uns wie feste Bahnen geradezu an unserem Ziel vorbeiführen können, so glänzend sie auch den Anforderungen eigentlich physikalischer Forschung gerecht werden.

Man gibt deshalb besser den weitreichenden Anspruch vorläufig auf, unmittelbar in systematischer Durchprüfung der Physik zu finden, was gesucht wird. Vielleicht, daß ein speziellerer Ausgangspunkt und eine bescheidenere Methode eher zum Ziele führen, wenn es das Ziel, irgendwelche physikalische Gestalten, überhaupt gibt.

Kaum hat je eine Zeit lebhafter als die unsere um die Frage gestritten, ob die wesentlichen Charaktere der Lebensvorgänge im Organismus sich gänzlich auf die Gesetze anorganischen Geschehens zurückführen lassen, oder ob besondere Kräfte, nur gerade dem Leben eigentümlich, überall in das chemische und physikalische Getriebe eingreifen und diesem als bloßem Rohmaterial des Organischen ihre höheren Formen aufprägen. Fragt man, welche Lebenserscheinungen die Vitalisten veranlassen, sich für diese zweite Ansicht zu entscheiden, so erweist sich als das Motiv vieler eine Art „Geschlossenheit“ des Organismus und seines Verhaltens. Denn der scheint seine Teile und Organe nicht wie die Posten einer Summe zu enthalten, sondern aus ihrer Gesamtheit ein Ganzes von neuen und wertvolleren Eigenschaften zu machen, und das eigentlich charakteristische Geschehen in ihm sieht nicht wie die jeweilige Resultante ungebundenen Durcheinanderwirkens von vielen Kräften aus, sondern wie die geordnete Antwort jener Einheit auf ihre aktuellen Lebensbedingungen im ganzen. Auch die auffallende Zweckmäßigkeit von Aufbau, Funktionen und Reaktionen der Lebewesen wird wohl mit derselben Grundeigenschaft des Organischen in engen Zusammenhang gebracht, und so findet man für die Biologie im allgemeinen ein Problem aufgeworfen, welches dem besonderen Gestaltproblem der Psychologie einigermaßen ähnelt. Dieselbe Verwandtschaft offenbart sich, wenn Vitalisten zur Erklärung der merkwürdigen Lebenserscheinungen biologische Kräfte von der Art und der Wirkungsweise gerade der höheren psychischen Faktoren postulieren; denn als die Grundform und

das Charakterisierende der höheren psychischen Gebilde stellt sich ja immer mehr der Typus „Gestalt“ heraus. Neuerdings wird gestaltmäßiges Verhalten bereits ausdrücklich als das wesentlich auszeichnende Moment des Organischen angegeben.

Das Bedürfnis, Gebilde und Vorgänge von Gestaltnatur zu scharf umrissenen Denkgegenständen zu machen, besteht also in der ganzen Biologie. Die spezifisch vitalistische Antwort auf die vorliegende Frage würde von vornherein die Möglichkeit echter physikalischer Gestalten ausschließen. Sucht man aber einmal nach solchen, so scheint es, als könnten die typischen Eigenschaften des Lebensgeschehens einen Hinweis darauf geben, in welcher Richtung die Physik zu durchsuchen wäre, wollte man allenfalls Gestalten in ihr finden; dort müßten ja die physikalischen Gebilde etwas von dem Einheitlich-Geordneten der organischen Welt zeigen. — Dieser Weg ist wiederholt im Interesse der Biologie begangen worden; aber die Erfahrung lehrt, daß er den Forscher nicht sehr weit führt, und jedenfalls wurde noch nicht viel mehr auf ihm gefunden als allerhand vage Analogien zwischen Kristallen und Organismen oder dergleichen.

Wenn also solche biologischen Fragen schon etwas bestimmtere Gesichtspunkte für das Suchen nach physikalischen Gestalten geben, so beweist doch der Mißerfolg, daß die Problemstellung noch immer den Fehler viel zu großer Allgemeinheit für einen ersten Anfang hat. Weit schärfere Richtlinien werden nötig, wir müssen mit viel genaueren Fragen an die Physik herantreten, um auf eine befriedigende Antwort rechnen zu können.

Die allgemeine Biologie und die Psychologie nähern sich einander maximal in der Theorie der nervösen Funktionen, insbesondere in der Lehre von den physischen Grundlagen des Bewußtseins. An dieser Stelle wird die Forderung unabweislich, organisches Geschehen, das höherem psychischen Geschehen unmittelbar entsprechen soll, an dessen wesentlichen funktionellen Eigenschaften teilnehmen zu lassen und deshalb organische Prozesse als Gestalten zu denken. Die Konsequenz und ihre ungewöhnliche Bedeutung wurden klar zuerst erkannt von Wertheimer, der damit den Gestalten einen Realitätsgrad beilegte, wie sie ihn zuvor bei weitem nicht besessen hatten. Neuerdings hat Koffka mit Entschiedenheit den gleichen Gedanken vertreten und mit Wertheimer verlangt, daß die zentralphysischen Prozesse „nicht als Summen einzelner Erregungen, also als »Und-Verbindungen«, sondern als gestaltete

Gesamtprozesse angesehen werden". — Ist aus den oben angeführten Gründen die Problemstellung gerade auf physikalische Gestalten gerichtet, so wird man eine Zusammenfassung der physiologischen und der physikalischen Frage auf folgende Weise fruchtbar zu machen suchen: Gibt es physikalische Gestalten, dann besteht begründete Hoffnung, zentral-physiologische Vorgänge von Gestaltcharakter als Spezialfälle von jenen her verstehen zu können. Umgekehrt liefert jeder konkrete Fall, in welchem Gestalten erlebt und deshalb nach dem Postulat von Wertheimer und Koffka von physischen Gestaltkorrelaten begleitet werden, bestimmte und spezielle Hinweise dafür, welche physikalischen Geschehensarten unter den gegebenen Umständen überhaupt als Grundlage gerade solcher Erlebnisse in Betracht kommen, wo also in der Physik nach Gestalten zu suchen ist.

Das ist es, was uns fehlte. An Stelle der allgemeinen, aber auch wenig bestimmten Aufgabe wird eine viel speziellere, aber ungleich konkretere gesetzt, und es geht doch nichts verloren, wenn man zunächst nur sie löst: Einmal kommt es dann zum Anfang einer Theorie wenigstens für die betreffenden physiologischen Gestaltkorrelate zu gleicher Zeit wie zu einem ersten Auffinden physikalischer Gestalten; die gedankliche Sicherung der Kategorie im Anschluß an älteres und reiferes Denken ist mit einem physiologischen Fortschritt verbunden. — Zweitens heben sich für uns die allgemeinsten Eigenschaften der Gestalten bisher als so merkwürdig von denen gewohnterer Denkgegenstände ab, daß man von vornherein sagen kann: Werden wir erst auf Einzelbeispiele von dergleichen in der Physik aufmerksam, dann müssen wir damit auch das Prinzip der Gesamtlösung getroffen haben; entweder gibt es überhaupt keine Gestalten in der Physik, oder, wenn wir uns vom Gegenteil in Einzelfällen überzeugen, so wird sich von ihnen aus Einsicht in das allgemeinere Problem bieten. Denn da die Physik als inhaltlich überreiches System vor unser aller Augen steht, so kann es sich ja nur darum handeln, wenn sie Gestalten enthält, den Blickpunkt zu gewinnen, der sie als solche erkennen läßt, sie in der Physik sehen zu lernen. Hierfür kann offenbar ein Spezialfall oder wenige das Nötige leisten. — Ist das richtig, so darf man endlich drittens erwarten, daß der spezielle Weg — von Einzelbeispielen nervösen Gestaltgeschehens zur Physik — schließlich auf andere und breitere Straßen ausmünden wird, welche von der Physik wieder in die Biologie zurückgehen und zu einer

umfassenderen physikalischen Behandlung der nervösen und überhaupt der organischen Gestaltprozesse führen.

Daß sich ein solches Programm nicht auf einmal in wissenschaftliche Wirklichkeit umsetzen läßt, kann derjenige am besten erkennen, welcher sich ernstlich bemüht hat, diese Verwirklichung wenigstens zu beginnen. Dies ist mir jedoch, wie ich hoffe, soweit gelungen, daß die ersten großen Schwierigkeiten als überwunden gelten können. Um so größer wird die Anzahl der nun freilich etwas konkreteren Forschungsfragen; denn auch was wir an Erscheinungen längst gewohnt sind und gerade deshalb als allzu selbstverständlich behandeln, nimmt alsbald wieder die lebhafteren und anziehenden Farben unbekannter Gebilde an. — Es war mir nicht möglich, die Folgerungen ganz zu übersehen, die sachlich vielleicht nach den ersten Schritten bereits notwendig werden, und andere, deren ungefähre Tragweite ich wohl erkenne, werden besser erst dargestellt, wenn sie ebenso zwingend wie vorläufig ungewohnt sind.

Einleitung für Physiker.

In einem physikalischen System werden zeitunabhängige Zustände, also solche des Gleichgewichts oder des stationären Geschehens, immer dann erreicht, wenn eine Bedingung für das Gesamtsystem erfüllt ist. Für dieses als ganzes muß die arbeitsfähige Energie ein Minimum, die Entropie ein Maximum geworden sein o. dgl., und die Skalaren oder Vektoren, um deren Gruppierung es sich handelt, sollen nicht in Einzelgebieten für sich bestimmte Beträge und Lagerungen annehmen, sondern durch ihre Gesamtgruppierung relativ zueinander im ganzen ein dauerndes Gebilde ergeben. Der Zustand oder das Geschehen an jeder Stelle hängt deshalb im Prinzip von den gegebenen Bedingungen auch in allen übrigen Bereichen des Systems ab. — Kann man dagegen die Gesetze zeitunabhängigen Zustandes für einzelne Teile eines physischen Komplexes gesondert, einzeln formulieren, dann bilden jene Teile nicht ein physikalisches System, sondern jeder allein ist ein solches für sich.

Zum Beispiel: In einem geschlossenen Stromkreis wird die Strömung an jeder Stelle von den Bedingungen an allen übrigen Punkten mitbestimmt, und die Bedingung stationären Flusses ist

notwendig auf das Gesamtsystem zu beziehen. Dagegen bildet eine Gruppe von gegenseitig isolierten Stromkreisen auch bei naher Nachbarschaft einen physischen Komplex selbständiger Einzelsysteme, deren jedes für sich die Bedingung stationären Geschehens erfüllt.

Im ersten Falle stellt die in sich zusammenhängende Gruppierung oder Struktur des betreffenden Systems eine objektive Einheit dar, so ausgedehnt das System im Raume sein mag; denn der lokale Zustand an keiner Stelle besteht ja selbständig für sich, und nur im Gesamtgebilde kann er sich halten, wie er ist. — Im zweiten Falle dagegen bilden die Teile des physischen Komplexes eine rein summative Mannigfaltigkeit; es liegt nur am willkürlichen Denken des Menschen, ob er sie überhaupt als eine Summe zusammenfaßt oder nicht.

Obwohl der Inhalt dieser Sätze für jeden Physiker eine Selbstverständlichkeit bedeutet (während die Formulierung von der gewohnten Ausdrucksweise der Naturwissenschaft etwas abweichen mag), ist es der erste Zweck dieser Schrift, die angegebenen Tatbestände an Einzelbeispielen deutlich aufzuweisen. Ein solches Verfahren wird deshalb notwendig, weil jene Sätze bei der theoretischen Behandlung biologischer Probleme sehr vielfach unbeachtet bleiben, und infolgedessen schwere Hemmungen des biologischen Denkens und Forschens eintreten.

Ein Beispiel aus der Psychophysik zeigt am besten, inwiefern diese Gefahr wirklich besteht. Der Physiologe oder Psychologe, welcher die Raumwahrnehmungen des Menschen durch eine physiologische Theorie der Vorgänge in Sinnesorgan und Nervensystem zu erklären sucht, verfährt dabei seit vielen Jahrzehnten so, daß er sich sagt: „Unter gewöhnlichen Umständen wirken gleichzeitig nebeneinander viele Reize auf unser Sinnesorgan und damit auf die zugehörigen Gebiete unseres Nervensystems ein. Wenn ich genau über die entstehenden Folgen unterrichtet sein will, so darf ich nicht so komplexe, ich muß Elementarvorgänge untersuchen und komme in diesem analytischen Bestreben notwendig dazu, zuerst die Einwirkung eines Reizes an einem Punkt für sich zu betrachten. Dasselbe Verfahren wende ich gegenüber dem zweiten Reiz an seiner Einwirkungsstelle an usw., und den komplexen Fall der Reizmehrheit im Nebeneinander leite ich hinterdrein durch Zusammenfügen jener Einzelvorgänge exakt ab, verstehe also auch das Gesamtgeschehen im betreffenden Gebiet des Nerven-

systems als Zusammensetzung der Elementarprozesse, welche die einzelnen Reize für sich dort erzeugen würden. So muß ich jede Wahrnehmung meines Auges physiologisch auf ein Mosaik von lokalen nervösen Einzelerregungen in der Sehrinde zurückführen, deren jede einem einzelnen Reizpunkt auf der Retina und einem Objektpunkt im Raume entspricht.“ Selbst Helmholtz hat seinen sinnesphysiologischen Gedanken durchweg diese Voraussetzung zugrunde gelegt, obwohl, wie ein Blick auf die oben vorangestellten Sätze zeigt, das Nervensystem ganz speziellen Bedingungen genügen, nicht „ein physikalisches System“ sein müßte, um derartiges zu ermöglichen.

Beschränkten Erklärungsabsichten konnte diese Denkweise eine Weile gerecht werden, aber als man etwas höhere Ansprüche an die Leistungsfähigkeit einer psychophysiologischen Grundannahme zu stellen begann, wurden sogleich die größten Schwierigkeiten sichtbar und ließen sich nur mühsam durch allerhand psychologische Hilfskonstruktionen von bedenklicher Willkür einigermaßen verdecken. Das Wesentliche dieser Verlegenheiten wurde schließlich durch v. Ehrenfels eindringlich dargestellt, und das „Gestaltproblem“, das er aufwarf, hat sich seither als eine Kernfrage von Psychologie und Psychophysik weit über das sinnespsychologische Gebiet hinaus erwiesen. Beschränken wir uns eben auf dieses, so ist die Problemlage folgende:

Voraussetzung. Erregungen, welche einer Reizvielheit entsprechen, sind rein summative Gruppen von Elementarvorgängen nebeneinander, deren jeder also einem einzelnen Reiz entspricht, und von denen keiner mit den übrigen etwas zu tun hat.

Optische Grunderfahrungen. Unsere Raumwahrnehmungen haben im allgemeinen den Charakter einheitlicher Verbände. Daß hier diese, dort jene Farbe als ein Stück optischer Gegebenheit ganz für sich aufträte, kommt in unserem Sehen nicht vor; ein jeder optische Bereich erscheint als eingegliedert und bezogen in die ausgedehnte Einheit des jeweiligen Gesichtsfeldes. — Wie ein jeder Bereich gesehen wird, erweist sich als abhängig nicht allein von dem Reiz, welcher nach der Voraussetzung das Geschehen eben an dieser Stelle für sich bestimmt, sondern in jedem Falle auch von den übrigen Reizen, die doch nur in anderen Bereichen wirksam werden sollten. Die sogenannten „optischen Täuschungen“ sind ein besonders auffälliges Beispiel hierfür.

Solche Erfahrungen und andere (die man leicht als mit ihnen in Zusammenhang stehend erkennt) sind der zugrunde gelegten

Voraussetzung so wenig gemäß, und diese gilt doch als so natürlich, daß jene Erscheinungen als Äußerungen ganz besonderer Kräfte gedeutet werden. Wenn exaktes Denken von physischem Geschehen scheinbar zu der Annahme zwingt, daß Reizvielheiten nur summative Gruppen von selbständigen und je den einzelnen Reizen zugehörigen Erregungen ergeben können, dann muß der Grund der angeführten Erfahrungen in der wenig bekannten Region höherer psychischer Vorgänge liegen, welchen man ohnedies merkwürdige Wirkungen über die Formen des physischen Naturgeschehens hinaus wohl zutraut. Und in diesem Falle darf man wirklich an der als exakt geltenden Voraussetzung festhalten; denn da wir von den eigenen Wahrnehmungen nur Kenntnis erhalten sollen, nachdem schon jene höheren Vorgänge mit äußerster Schnelligkeit und heimlich ihr Werk verrichtet haben, so könnte immer im ursprünglichen physiologischen Geschehen alles genau nach der Voraussetzung zugegangen sein, ohne daß doch unsere Wahrnehmungen demgemäß ausfallen müßten.

Der Psychologe nennt räumlich ausgedehnte Einheiten der im Gesichtsfeld auftretenden Art „Gestalten“. Daß die Eigenschaften von „Gestalten“ stets auf besondere und höhere Geistestätigkeiten zurückgehen, würde wohl bei dem Mangel an bestätigender Erfahrung über diese Hilfskräfte kaum jemand annehmen, wenn nicht jene Voraussetzung wäre und der Glaube, man sei zu ihrer Anerkennung verpflichtet, „weil die Naturwissenschaften jedes Gesamtgeschehen als die Summe einzelner Einwirkungen und ihrer Folgen erklärten“. Tun sie das wirklich?

Vor einigen Jahren haben Wertheimer und im Anschluß an ihn Koffka eine physiologische Hypothese über das Geschehen im Nervensystem vertreten, welche mit den zu Anfang angeführten Sätzen über physikalische Systeme dem Sinn nach gleichbedeutend ist. Jene Grunderfahrungen über ruhende „Gestalten“ der optischen Raumwahrnehmung erfordern ja zu ihrer Erklärung nichts weiter, als daß man dem optischen Sektor des Nervensystems die Eigenschaften „eines physikalischen Systems“ zuerkennt, daß man also auch stationäre Zustände in ihm als ausgedehnte Geschehenseinheiten versteht, die im Prinzip als ganze und an jeder Stelle der Gesamtheit der jeweiligen Reizbedingungen gemäß sind. Irgendein sehr starkes Motiv aber muß den Menschen in die Richtung eines mehr summativ-geometrischen als physikalischen Denkens treiben. Denn obwohl die Hypothese Wertheimers (und Koffkas) im Grunde

nur den Übergang zur eigentlich physikalischen Auffassung des nervösen Geschehens bedeutete, begegneten ihre Ausführungen doch vorsichtiger Zurückhaltung, als würden darin gewagte und überdies dunkle Neuerungen vom Denken verlangt. Sie widersprachen eben durchaus jener Voraussetzung, die man gerade als naturwissenschaftlich glaubte festhalten zu müssen, obwohl sie es gar nicht war; und folglich mußte das Mißtrauen so lange andauern, bis die Voraussetzung als irrig erwiesen wurde.

Dies kann nur geschehen, indem man die Eigenschaften physikalischer Systeme, der Zustände und Vorgänge in ihnen, unter dem Gesichtspunkt unserer Fragestellung aufmerksam betrachtet. Und da jene bisher in der Psychophysik noch herrschende Anschauung nicht so sehr von der logischen Kraft einer entsprechenden Begründung als von tief eingewurzelter Denkgewohnheit festgehalten zu werden scheint, so würde es zu nichts helfen, wollte man nur im allgemeinen und in kurzem Beweis zeigen, wie wenig die Physik des Anorganischen mit jener Annahme übereinstimmt: Gegen eine Gewöhnung hilft gründlich nur eine andere, und deshalb ist in dieser Schrift der Nachweis „physikalischer Gestalten" mit großer Breite und bis ins einzelne geführt, damit sich der Leser bei der genauen Betrachtung konkreter Fälle in größerer Zahl mit der verkannten physikalischen Denkart hinreichend auch für die Zukunft und eigenes Weiterarbeiten vertraut machen könne.

Der Physiker selbst findet bei dieser Art der Darstellung ihm bekannte Dinge nur in anderer als der gewohnten Beleuchtung wieder, wie es die Rücksicht auf eine besondere von Psychologie und Biologie her bestimmte Fragerichtung erfordert. Erst die Versuche, Anwendungen des physikalischen Denkens auf einige psychophysische Probleme zu machen, enthalten für ihn Neues. Freilich scheint es, als werde eine konsequente Fortbildung der Theorie physischer Gestalten später auch für die reine Physik förderlich sein können. Eine ähnliche Frage wie eben für Ruhezustände und stationäres Geschehen in räumlicher Ausbreitung kann auch für dynamische Verläufe in physikalischen Systemen erörtert werden, und die hieran anschließende Behandlung von komplexeren Gestaltfällen der allgemeinen Biologie führt schnell zu Aufgaben, deren Lösung als wesentlich auch für rein physikalische Interessenrichtung gelten muß.

Abschnitt I.

Ableitung eines ersten physischen Gestaltfaktors.

Erstes Kapitel.

Die charakteristische Eigenschaft stationär erregter somatischer Felder.

1. Als Ausgangspunkt wird der am besten bekannte Fall erlebter Gestalten gewählt, das Wahrnehmen von Gestalten in räumlich ausgedehnten Feldern, wie es bis zu einem gewissen Grade auf taktilem, unvergleichlich höher, besonders beim Menschen, auf optischem Gebiet ausgebildet ist. In beiden Fällen lehrt die einfachste Erfahrung, daß eine Bedingung erfüllt sein muß, sollen anders auf Wahrnehmungswege Gestalten und etwa, an sie anschließend, noch höhere Prozesse zustande kommen: Wir fühlen und sehen erst Gestalten im gebräuchlichen Sinne des Wortes, wenn die räumlich ausgedehnten Wahrnehmungsfelder in nicht homogener Weise ausgefüllt sind. Eine Form muß unsere Körperoberfläche auf irgendwie beschränktem Gebiet berühren, der Druck muß gegen unbeeinflußte oder schwächer berührte Haut abgegrenzt sein, damit von einer taktilen Gestalt die Rede sein kann, und nur wenn Farbenunterschiede im Gesichtsfeld vorkommen, ergibt sich die Möglichkeit, Gestalten zu sehen. Alles, was auf Wahrnehmungen folgend, Gestaltfaktoren in ihnen zur Voraussetzung hat, ist damit der gleichen Bedingung unterworfen. Augen-, Glieder- und Körperbewegungen, die von Gestalten bestimmt werden, Erkennen und Vergleichen an Gestalten, sowie die anderen Denkvorgänge alle, die von Gestaltwahrnehmungen ausgehen, sind indirekt an jene Regel gebunden.

Daß ein schlechthin homogenes Feld von sich aus das alles nicht zu erzeugen vermag, wie es ja auch gestaltfrei ist, erscheint zunächst als eine Trivialität. Wir weisen aber sofort auf den Kern der folgenden Überlegung hin mit den Fragen: Ändert sich beim Übergang von einem homogenen zu einem nicht homogenen Feld etwas Wesentliches an dem betreffenden Teil des Nervensystems,

derart, daß ein neuer, gerade für das inhomogene Feld charakteristischer Faktor auftreten kann oder muß? — Kann man den neuen Faktor physikalisch verstehen und aus bekannten Eigenschaften des Nervensystems physikalisch ableiten? — Hat der neue Faktor, der nach Voraussetzung mit dem Möglichwerden von Gestalten zugleich gegeben ist, selbst Gestalteigenschaften?

2. Um diese Fragen beantworten zu können, legen wir der Betrachtung ein somatisches Feld zugrunde, welches die allgemeinen Eigenschaften zentraler Gebiete im Nervensystem von Warmblütern haben soll und mit der unmittelbar den peripheren Reizungen ausgesetzten Sinnesfläche in folgender Beziehung steht: Aneinandergrenzenden Elementen der Sinnesfläche entsprechen durch verbindende Leitung stets nächst benachbarte Elemente des nervös-somatischen Feldes oder Hirnteiles, ohne daß doch den Größenmaßen nach dieses Feld eine ähnliche Abbildung jener Fläche zu sein brauchte. Es wird nur verlangt, daß einer stetigen geometrischen Ortsänderung auf der Sinnesfläche eine stetige Verschiebung durch unmittelbar benachbarte Elemente im somatischen Feld entspreche.

Ein solches schematisch entworfenes Bild nervöser Felder läßt sich zunächst so viel leichter behandeln als adäquatere Vorstellungen, daß man wohl gut tut, die Überlegungen mit ihm zu beginnen. Noch einfacher würde die Anschauung, mit der man operiert, wenn das somatische Feld geradezu als geometrische Abbildung der Sinnesfläche vorausgesetzt wäre, und auch gegen eine derartige vorläufige Erleichterung ist schließlich nichts einzuwenden, falls man sie wirklich als Fiktion einschätzt. Im Verlauf der weiteren Untersuchungen gelangt man von selbst dazu, aus den vereinfachten Vorstellungen zu entfernen, was nicht den Tatsachen zu entsprechen braucht, und einzuführen, was der Realität näher kommen muß. Man findet dann hinterdrein, daß das schematische Bild in diesen ersten Erwägungen noch keinen wirklichen Fehler veranlaßt hat. (Vgl. jedoch unten 244.)

Das nervöse Feld kann der Sinnesfläche näher oder ferner liegen, falls nur jene Stetigkeit der Zuordnung erhalten bleibt. Darf die Sinnesfläche selbst als ein Teil des Zentralnervensystems aufgefaßt werden, wie das in so vielen Hinsichten, entwicklungsgeschichtlich, chemisch und strukturell, von der Retina gilt, so können die folgenden Überlegungen auch auf diese Sinnesfläche unmittelbar bezogen werden, die dann selbst ein somatisches Feld ist.

Über die Erregungen im somatischen Feld wird im Hinblick auf die Fragen des ersten Paragraphen eine einfache Annahme gemacht[1]): Ist die Reizung der Sinnesfläche in allen Teilen gleichartig, so entsteht im Feld unter normalen Umständen eine ebenfalls durchweg gleichartige Erregung. Besteht überhaupt keine

[1]) Die Annahme ist zu allgemein und kann später leicht eine Korrektur erfahren, auf die hier nichts ankommt.

periphere Reizung, so ist das somatische Feld entweder erregungslos oder überall (spontan) gleichartig erregt. Fällt dagegen die Reizung der Sinnesfläche in verschiedenen Gebieten verschieden aus, oder wird nur ein Teil der Sinnesfläche gereizt, so ergeben sich auch in verschiedenen Bereichen des somatischen Feldes Erregungsunterschiede. — Nicht normale Umstände, bei denen diese Annahmen unrichtig werden können, sind z. B. gegeben, wenn die jüngste Vorgeschichte oder andere Anlässe Sinnesfläche und somatisches Feld in verschiedenen Teilen ungleichwertig gemacht haben. Im übrigen kann Homogenität und Unhomogenität hier und dort als zugleich bestehend vorausgesetzt werden.

3. Es handelt sich nun darum, die Natur der Erregungen im betrachteten Feld näher zu bestimmen, und zwar vorläufig ohne Rücksicht darauf, ob die Prozesse in ganzer Breite gleichartig oder in verschiedenen Gebieten verschieden verlaufen. Dem aufgestellten Programm gemäß ist womöglich die Art der Erregungen vom Standpunkt der anorganischen Naturwissenschaften aus festzulegen.

Für den Fall optischer Erregungen hat G. E. Müller, ausgehend von der Farbenlehre Herings, die ausdrücklich biologische Vorstellungen verwendet, eine Betrachtungsweise ganz im Sinne der physikalischen Chemie eingeführt[1]), und damit, wenn man selbst von den sachlichen Vorteilen der neuen Theorie absieht, vor allem eine wichtige methodische Verschärfung erreicht. Die weniger bestimmten Begriffe der Assimilation und Dissimilation (Hering) drängen von sich aus nicht ohne weiteres zur Entwickelung sehr bestimmter Konsequenzen. Erfolgt ein Einwand, so wird er von der etwas unbestimmten Position aus leichter abgewehrt, aber nicht eigentlich entscheidend widerlegt werden können. Sobald man dagegen die betrachteten Vorgänge als Fälle von chemischen Reaktionen auffaßt, eröffnen sich, wie wir sehen werden, die weiteren Möglichkeiten nach allen den Seiten, nach welchen ohnehin jener Begriff in ein hoch entwickeltes System eingefügt ist. Zu gleicher Zeit kommt man in die heilsame Gefahr, bei jedem Schritt von der Grundannahme an in Konflikt mit Tatsachen oder mit anderen Gebieten naturwissenschaftlicher Theorie zu geraten.

Ein wesentlicher Bestandteil der Müllerschen Annahmen ist darin zu sehen, daß an Stelle von Assimilation und Dissimilation die beiden einander entgegengesetzten Richtungen einer umkehrbaren chemischen Transformation treten. Das soll zunächst von den retinalen Prozessen gelten, doch hat Müller selbst die weitere Möglichkeit einer ganz analogen Hypothese für die zentrale Seh-

[1]) Zeitschr. f. Psychol. usw. **10** und **14**.

substanz erwähnt[1]). Dieser Gedanke wird hier übernommen und dahin verallgemeinert, daß in dem betrachteten somatischen Felde, ebenso wie nach Müller in der Retina, die Erregungen chemische Reaktionen sind, im taktilen Gebiet ebenso wie im optischen. Der Begriff der chemischen Reaktion ist dabei in weitem Sinne zu verstehen, derart, daß auch Vorgänge wie Polymerisation, Dissoziation, Ionenspaltung, Reaktionen von Kolloiden u. dgl. einbeschlossen werden. Daß die Transformationen als prinzipiell umkehrbar vorausgesetzt werden, soll nicht besagen, daß sie alle im Nervensystem auch wirklich nach beiden Richtungen verlaufend vorkommen, sondern nur, daß sie den Gesetzen umkehrbarer Reaktionen folgen. Auf diese kommt es mir an.

Aus dem wesentlichen Grundsatze Müllers folgt hier an Konsequenzen, was sich aus ihm allein ableiten läßt. Andere selbständige Hypothesen, die Müller mit ihm verbunden hat, können hier beiseite bleiben, da das Folgende von ihnen unabhängig ist und aus so wenig Annahmen wie möglich abgeleitet werden soll. Einwände also, die gegen irgend einen Teil der Müllerschen Theorie außer dieser Grundvoraussetzung und ihren direkten Konsequenzen erhoben werden könnten, würden den folgenden Gedankengang nicht berühren.

4. Verschiedenen Arten und verschiedenen Intensitäten der Reizung werden im allgemeinen verschiedene chemische Reaktionen in somatischen Feldern entsprechen müssen. Es ergibt sich die Aufgabe, aus der Natur der im Nervensystem möglichen Reaktionen abzuleiten, wodurch eine bestimmte Reaktionsart charakterisiert ist, und wie sich deshalb mehrere voneinander unterscheiden. Da jedoch zur Lösung dieser Frage der fundamentale Begriff des „stationären Vorganges“ aus den Naturwissenschaften heranzuziehen ist, so bedarf es einiger Sätze zur Sicherung seiner Bedeutung im neuen Anwendungsfalle.

Man unterscheidet zwischen Zuständen des vollkommenen Gleichgewichtes (Ruhe), stationären Zuständen, quasistationären Prozessen, periodisch-stationärem Geschehen und endlich dynamischen Verläufen. — Die erste Art, am einfachsten repräsentiert durch einen Körper, der auf dem Tische liegt und dessen Gravitieren durch die elastische Gegenkraft der Tischplatte kompensiert wird, bedarf einer näheren Erläuterung nicht. Würde derselbe Körper im Vakuum fallen, so läge ein dynamischer Verlauf, Vertreter der letzten Klasse, vor und wäre, etwas oberflächlich, aber für diesen Zusammenhang hinreichend, dadurch zu charakterisieren, daß während des ganzen Vorganges keine Phase die Eigenschaften eines Gleichgewichtes

[1]) Zeitschr. f. Psychol. usw. **14**, 42, 63 f. Man darf wohl annehmen, daß in den übrigen Ausführungen Müllers über die zentralen Erregungen (a. a. O. **10**, 31, 344 f. und **14**, 40 ff.) diese ebenfalls als chemische Umsetzungen gedacht sind.

hat, und deshalb z. B. die Raumkoordinaten (der Ort) des Körperschwerpunktes in keinem Augenblick zur Angabe seines Zustandes genügen. — Periodisch-stationär ist z. B. die Resonanz einer Membran auf eine sie treffende Schwingung von bestimmtem, sich ständig wiederholendem Verlauf. Eine vollständige Schwingung der Membran wird in diesem Zustand für jede ihrer Phasen von der gesamten zeitlich ausgedehnten Form einer vollständigen Erregerwelle bestimmt.

Von stationärem Geschehen oder stationärem Zustand spricht man, wenn ein System fortwährend denselben Vorgang durchmacht, dabei aber in keiner seiner Systemeigenschaften verändert wird. Das geläufigste Beispiel für ein derartiges Geschehen stellt unter geeigneten Bedingungen die Strömung einer Flüssigkeit in Rohren dar; fließt an jedem Punkt stets ebensoviel ab, wie zuströmt, so wird der ganze Komplex seine Eigenschaften nicht ändern, obwohl sich überall in ihm ein Geschehen abspielt. Konstante elektrische Ströme bilden ein zweites Beispiel dieser Gruppe. — Wechseln plötzlich die Bedingungen, denen das System unterworfen ist, so wird die Folge ein dynamischer Vorgang und eine Änderung der Systemeigenschaften sein müssen, da ja die alte Strömungsart den neuen Umständen nicht entspricht; oft aber wird dieser dynamische Verlauf in einen zweiten stationären Zustand überführen können, der nunmehr den veränderten Bedingungen gemäß ist. Wiederholt man, zu immer neuen Bedingungen fortschreitend, diese Beeinflussung, läßt aber jedesmal dem System Zeit, zum neuen stationären Geschehen zu gelangen, so ergibt sich eine ganze Reihe stationärer Zustände, von denen je zwei durch einen dynamischen Verlauf verbunden sind. Es ist nun möglich, den Charakter des Dynamischen in der Überführung vom einen zum anderen stationären Geschehen mehr und mehr zurücktreten zu lassen, wenn man die Bedingungsänderungen in kleineren Beträgen vornimmt. Je geringfügiger die jedesmalige Änderung ist, desto weniger wird das System jemals hierbei die Eigenschaften stationären Geschehens verlieren, und im Grenzfall darf ohne merklichen Fehler der ganze Vorgang theoretisch angesehen werden als eine Abfolge äußerst benachbarter stationärer Zustände. Freilich muß er sich jetzt mit der größten Langsamkeit abspielen. — Solche veränderliche Prozesse, bei denen die Bedingungsänderungen langsam genug erfolgen, um das Auftreten der spezifisch dynamischen Faktoren unmerklich zu lassen, heißen quasistationär. Es ist jedoch scharf zu betonen, daß die Behandlung eines physischen Verlaufes als quasistationär durchaus an die Bedingung sehr langsamer Änderungen gebunden ist, und daß die Möglichkeit, einen solchen Fall als Abfolge stetig ineinander übergehender stationärer Zustände zu betrachten, durchaus

nicht erlaubt, auch beliebig schnelle Verläufe ebenso zu behandeln, anstatt, wie es sein muß, als dynamische Prozesse. (Der Fehler wäre anderenfalls genau so groß, als wollte jemand etwa alle thermodynamischen Transformationen als reversible Vorgänge ansehen.) — Um quasistationäre Prozesse handelt es sich z. B., wenn die gesamte in einem Stromkreis wirksame elektromotorische Kraft (von galvanischen Elementen) durch Polarisation eine Verminderung erfährt. Der hierdurch veranlaßte Abfall der Stromstärke erfolgt zu langsam, als daß etwa die dynamische Erscheinung der Selbstinduktion einen merklichen Einfluß gewinnen könnte.

Die Unterscheidung der fünf Typen gilt in der Physik als elementar. Man findet jedoch, daß in der Psychologie Unklarheiten in dieser Hinsicht vorkommen; deshalb wurden die Gruppen eigens aufgeführt. Besonders häufig ist der Fall, daß dynamische Vorgänge fälschlich als quasistationäre Abfolgen behandelt werden; manche verkennen aber auch die Natur periodisch-stationären Geschehens.

5. Im Nervensystem entspricht gewiß nicht einer bestimmten Reizart (und Reizstärke) für die gesamte Dauer von deren Einwirkung ein und derselbe Erregungszustand in Sinnesfläche und durch Leitung mitbetroffenen somatischen Feldern. Das erste Einsetzen des Reizes scheint vielmehr von einem schnell ablaufenden Prozeß gefolgt zu sein, währenddessen von einer sich gleich bleibenden Erregung gar keine Rede sein kann. Hat andererseits der Reiz eine Weile eingewirkt, so verschiebt sich der Zustand mindestens der Sinnesfläche und wohl deshalb schon notwendig auch der zentralerer Felder infolge von Ermüdungswirkungen u. dgl. Dazwischen aber gibt es unzweifelhaft eine Periode, in welcher bei fortdauerndem Reiz der Erregungszustand nur sehr langsame Änderungen durchmacht, und auch die später folgenden Verschiebungen infolge Ermüdung verlaufen sicherlich mit sehr geringer Geschwindigkeit. Fassen wir also jede Erregung, welche unter dem Einfluß eines bestimmten dauernden Reizes entsteht, als chemische Reaktion auf, so darf diese — immer unter Ausschluß der ersten Momente — entweder als stationärer Zustand behandelt werden, oder kann wenigstens als quasistationärer Prozeß gelten[1]). Da hiernach eine absolut feste Koppelung von Reiz und Reaktionsart nicht vorauszusetzen ist, so legen wir im folgenden zunächst weniger Gewicht auf die Art der Abhängigkeit von den Reizen und halten uns an den wesentlichen Umstand, daß bei irgendeinem konstanten Reiz ein spezifisch dynamischer Verlauf nur ganz zu Beginn in

[1]) Ich mache hier die unrichtige Voraussetzung, daß die Reaktionen in beschränktem Bereich einer Sinnesfläche oder eines Feldes nur von dem Reiz für diesen Bereich abhängen. Das geschieht der Einfachheit wegen, beeinflußt diese ersten Überlegungen nicht im Sinne einer Fälschung ihrer Ergebnisse und kann nachher korrigiert werden.

Frage kommt, weiterhin dagegen das Verhalten von Sinnesfläche und somatischem Feld als stationär oder genauer als Abfolge nächst benachbarter stationärer Zustände (als quasistationär) betrachtet werden darf.

Die nächste, schon bestimmtere Frage lautet: Wodurch ist eine stationäre Reaktion unter vielen möglichen zu charakterisieren?

6. Die Betrachtung von Lebensvorgängen im Nervensystem der Warmblüter, also auch des Menschen, wird vielfach dadurch erleichtert, daß diese Prozesse sich mit recht großer Genauigkeit bei konstanter Temperatur abspielen. Es kann wohl als ausgeschlossen gelten, daß sich im Verlauf irgendwelcher Reaktionen, wie wir sie hier zu untersuchen haben, Teile des Zentralnervensystems weit genug von ihrer Durchschnittstemperatur entfernen, um durch Temperaturwechsel den betreffenden Prozeß wesentlich zu beeinflussen. Die Wärmetönung der Transformationen im Organismus ist bedeutend, da sie ja, alles zusammengenommen, hinreicht, den Körper des Warmblüters weit über der Umgebungstemperatur zu halten; aber durch (noch nicht ganz verständliche) Regelung der Wärmeproduktion und des Wärmeflusses ist im ganzen dafür gesorgt, daß schnelle und beträchtliche Verschiebungen des Temperaturniveaus nicht vorkommen [1]). Danach haben wir die stationären Reaktionen im Nervensystem als isotherm im Sinne der Thermodynamik zu behandeln, und da Isothermie die Voraussetzung dafür ist, daß das Gesetz der Massenwirkung ohne weiteres auf eine Reaktion anwendbar sei, so gelangen wir nach dem Vorgang G. E. Müllers dazu, mit Hilfe dieses Satzes die nähere Charakterisierung bestimmter stationärer Reaktionsarten vorzunehmen.

7. Der Verlauf isothermer chemischer Reaktionen hängt außer von der chemisch-qualitativen Natur der aufeinander einwirkenden Substanzen (und den äußeren Bedingungen: Druck und bestimmtem Betrag der konstanten Temperatur) direkt von den Mengen ab, mit denen die reagierenden Stoffe einerseits und die Umsetzungsprodukte andererseits gerade im Reaktionsgemisch vorhanden sind. Je mehr Material der ersten Art und je weniger der zweiten Art im gegebenen Raume zur Verfügung steht, desto schneller läuft

[1]) Man könnte auch sagen: Die Reaktionen wären eben nicht stationär oder quasistationär, wenn die Temperatur nicht sehr angenähert konstant bliebe; aber wenigstens formal wäre dieser Schluß nicht ganz zwingend. Deshalb ist es besser, man betont, daß Erfahrung die Isothermie des Körperinnern lehrt. Im Falle von fiebrigen Über- oder von Untertemperaturen hält sich die Temperatur während eines begrenzten Zeitintervalls zwar auf einem anderen, aber doch wieder auf konstantem Betrag.

die Transformation in der vorausgesetzten Richtung ab, desto energischer suchen also, vulgär gesprochen, die reagierenden Stoffe sich in ihre Umsetzungsprodukte zu verwandeln; je weniger von ihnen und je mehr von den Produkten vorhanden ist, desto träger wird der Vorgang. Aber weiter: Sind von vornherein die Materialmengen zweiter Art über ein gewisses Maß hinaus reichlich zugegen, so vollzieht sich die Reaktion im entgegengesetzten Sinne, und was eben Transformationsprodukt genannt wurde, wird Reaktionsmaterial, was eben Reaktionsmaterial hieß, wird zum entstehenden Erzeugnis des nunmehr umgekehrten Vorganges. Für dessen Schnelligkeit gilt dann wieder das entsprechende Gesetz der genauen Abhängigkeit von den Massen, nur auch natürlich im entgegengesetzten Sinne. — Nichts anderes besagt es, wenn man die Reaktionen als umkehrbar bezeichnet[1]).

Da hiernach ein Reaktionsverlauf bestimmter Richtung schneller zu werden beginnt, sobald eine Vermehrung des Reaktionsmaterials oder eine Verminderung der Transformationsprodukte im Gemisch eintritt, und da andererseits der Vorgang sich verlangsamt, sobald es zu einer Verminderung von jenem oder zu einer Vermehrung dieser kommt, so muß die Umsetzung dieselbe bleiben, konstante Geschwindigkeit annehmen, stationär werden, wenn das Reaktionsmaterial sowohl wie die Transformationsprodukte aus irgendwelchen Gründen gleichen Betrag behalten, obwohl fortwährend jenes Geschehen stattfindet. — Auch im betrachteten somatischen Felde werden also stationäre isotherme Prozesse dann realisiert, wenn diese Bedingung in ihm erfüllt ist, trotz dauernden Reaktionsverlaufes die Stoffmengen jeder Art im Umsetzungsgemisch dieselben bleiben und deshalb (bei konstanten äußeren Bedingungen) keine Änderung in der Schnelligkeit der Transformation erfolgen kann. Quasistationär werden die Prozesse, wenn die jeweils vorhandenen Stoffmengen zu allmählich wechseln, als daß eine abrupte Änderung der Reaktionsgeschwindigkeit eintreten könnte, und daher das Gesamtgeschehen wie eine langsame Abfolge äußerst benachbarter, jeweils stationärer Reaktionen angesehen werden darf.

Offenbar ist Voraussetzung für ein Geschehen vom angegebenen Typus, daß in demselben Maße, wie die Umsetzung geschieht, einerseits die verbrauchten Substanzmengen ständig durch neue gleicher Art gerade ersetzt werden, und daß zugleich die entstehenden Produkte ebenso schnell entfernt werden, wie sie sich bei der

---

[1]) Fachgenossen, die bisher keinen Anlaß gehabt haben, sich mit physikalischer Chemie zu beschäftigen, finden eine leichtverständliche Darstellung des Massengesetzes bei Nernst, Theoretische Chemie (7. Aufl.), S. 470 ff. u. 579 ff.

Transformation bilden. Mit der gleichen für die jeweilige stationäre Reaktion charakteristischen Geschwindigkeit müssen also im idealen Falle die Umsetzung selbst, der Ersatz des Reaktionsmaterials und die Entfernung der entstehenden Produkte geschehen, soll anders der Vorgang stationär bleiben. Wird dieser Anforderung nicht ganz vollkommen genügt, so stellt das Geschehen eine quasistationäre Abfolge dar, und dieser Fall liegt der Erfahrung nach eben bei konstantem Reiz in den somatischen Feldern vor. Denn unzweifelhaft ändert sich auch bei konstanten äußeren Bedingungen (der Reizung) ganz allmählich der Vorgang in ihnen.

Stationäre chemische Reaktionen sind die meisten der elektrochemischen Umsetzungen, insofern in einer elektrolytischen Zelle oder einem galvanischen Element nach Faraday die Transformationen der Stromstärke proportional verlaufen und also bei konstantem Strom die gleiche Reaktionsgeschwindigkeit beibehalten. In einem Daniellelement z. B. löst sich bei geschlossenem Strom (und bei unveränderlichem Widerstand) pro Zeiteinheit ein bestimmtes Quantum Zink; dieses Reaktionsprodukt wird im gleichen Maße von der Strömung fortgetragen, aber die Oberfläche der Zinkelektrode liefert auch ständig dieselben Beträge nach. Wenn ein Element stark polarisierbar ist wie das von Leclanché, dann sinkt die Stromstärke allmählich und mit ihr zugleich die Reaktionsgeschwindigkeit an der Zinkelektrode; dieser Vorgang stellt also ein quasistationäres chemisches Geschehen dar [1]).

Auf welche Art die reagierenden Mengen in nervösen Feldern wenigstens ungefähr konstant gehalten werden, wenn dieselbe äußere Reizung andauert, ob insbesondere nur der reichlichen Durchblutung des Zentralnervensystems dieser Erfolg zuzuschreiben ist, kann hier unerörtert bleiben, da die relativ geringe „Ermüdbarkeit“ der betrachteten Organe ja als wichtige Tatsache hinreichend bekannt ist [2]). Die Zuführung von Reaktionsmaterial in zentraleren somatischen Feldern könnte auch auf ganz anderem Wege erfolgen als durch den ernährenden Blutstrom.

Etwas Wunderbares darf man in dieser Regelung schon deshalb nicht sehen, weil sie in Wirklichkeit ja durchaus nicht mit idealer Vollkommenheit erfolgt, und nur hinreichend ist, um die Veränderungen zu einer quasistationären Abfolge zu machen.

Das Ergebnis dieser Überlegung ist erst klar zu formulieren, wenn man zuvor festgestellt hat, in welchem Sinne der Ausdruck „Substanzmengen“ zu verstehen ist. — Die Mengen kommen nicht als absolute Quantitäten in Betracht. Es macht offenbar für den Charakter eines stationären chemischen Geschehens keinen Unterschied aus, ob z. B. in dem Volumen 1 die Mengen 1 a und 1 b

---

[1]) Vgl. Nernst, a. a. O., S. 754 f., 777.

[2]) Auch das retinale Geschehen muß als quasistationär gelten (bei konstantem Reiz). Die Retina ist nur relativ stark ermüdbar, verglichen z. B. mit dem Ohr.

an Reaktionsmaterialien, 1c und 1d an Umsetzungsprodukten konstant gehalten werden und dabei eine stationäre Transformation verläuft, — oder ob im (doppelten) Volumen 2 die Mengen 2a und 2b, 2c und 2d konstant bleiben und stationär reagieren. In jedem Element des Systems geprüft, ist die Reaktionsgeschwindigkeit und damit die Natur der Umsetzung beide Male genau dieselbe. Es kommt also anstatt auf die absolute Menge, mit der eine Substanz im System zugegen ist, nur auf die Menge relativ zum gegebenen Raum an, d. h. auf die Menge pro Volumeneinheit. — Zu zweit sieht man, daß die Mengen nicht einfach als „Massen" zu verstehen sind. Chemische Umsetzungen erfolgen nicht nach Gramm schlechthin, sondern nach reaktionsfähigen Substanzbeträgen; nicht wieviel diese wiegen, sondern wieviel Moleküle sie enthalten, bestimmt ihre Geltung als chemische Faktoren, und deshalb werden den Molekulargewichten proportionale Substanzmengen, sogenannte Mole, als Einheiten der Stoffmengen verwendet. — Im ganzen ist also die Bestimmung in Molen pro Volumeneinheit vorzunehmen; in diesem Maße bestimmt, heißen die Substanzbeträge Konzentrationen.

Eine bestimmte stationäre Reaktion ist dadurch zu charakterisieren, daß die Konzentrationen aller beteiligten Stoffarten im Gemisch während des Vorganges auf gleichen Beträgen erhalten werden. Unter dieser Bedingung bleibt das Geschehen sich selbst gleich und wird durch die betreffenden Konzentrationen genau bestimmt.

Einen mathematischen Einwand gegen diese Darstellung will ich wenigstens kurz erwähnen. Sind c_1, c_2 usw. die Konzentrationen von Reaktionsmaterialien, von denen je n_1, n_2 usw. Moleküle an der Umbildung teilnehmen, ferner c_1', c_2' usw. Konzentrationen von Transformationsprodukten, die mit je n_1', n_2' usw. Molekülen an dem umgekehrten Vorgang beteiligt wären (oder sind), werden endlich mit s die umgesetzte Menge, mit t die Zeit, mit k und k' die Geschwindigkeitskoeffizienten bezeichnet, so ist

$$\frac{ds}{dt} = k\, c_1^{n_1} c_2^{n_2} \ldots - k'\, c_1'^{n_1'} c_2'^{n_2'} \ldots = \text{const.},$$

wenn es sich um einen stationären Zustand handelt. Für einen bestimmten Wert der Reaktionsgeschwindigkeit (const) hat diese Gleichung natürlich sehr viele Lösungen, sehr verschiedene Kombinationen von Konzentrationen geben, in den Ausdruck eingesetzt, die gleiche Geschwindigkeit. Für den Fall der Reaktionen in somatischen Feldern ist dieser Einwand jedoch rein formaler Art. Denn bei konstanten Bedingungen der Reizung usw. kann eine bestimmte Reaktionsgeschwindigkeit im Nervensystem natürlich nicht auf ganz verschiedene Arten realisiert werden, sondern nur dadurch, daß jede Konzentration einen bestimmten, jenen Bedingungen und der Geschwindigkeit zugehörigen Wert annimmt. Das ist auch im folgenden als der Sache nach wohl selbstverständlich vorausgesetzt.

8. Eine und dieselbe Art von Umsetzungen kann je nach den Bedingungen des Geschehens mit sehr verschiedenen Reaktions-

geschwindigkeiten stationär sein. Werden unter sonst gleichen Umständen die Konzentrationen verschieden gewählt, die jeweils im System konstant bleiben, so stellen die vielen auf diese Weise möglichen Zustände stationären Charakters eine ganze (stetige) Reihe verschiedener Erregungen oder Reaktionen dar, die doch alle qualitativ einander nahe verwandt sind. Eine jede ist durch die gerade ihr zugehörigen (sie ermöglichenden) Konzentrationen der reagierenden Stoffarten vollkommen bestimmt; diese Stoffarten selbst aber sind innerhalb der ganzen Reihe durchweg qualitativ dieselben.

Fällt diese Einschränkung fort, und ist das betrachtete Feld (wie im optischen Sektor des Nervensystems) unter wechselnden äußeren Umständen auch noch qualitativ (im engeren Sinne) verschiedener Reaktionstypen fähig, so gilt für jede Reaktionsart dasselbe wie für die bisher vorausgesetzte eine. Jeder qualitative Umsetzungstypus läßt sich wenigstens im Prinzip bei sehr verschiedenen Transformationsgeschwindigkeiten und folglich Konzentrationen der im betreffenden Falle reagierenden Molekülarten stationär machen, und jeder solche Typus kann deshalb eine ganze Reihe von Reaktionen an gleichartigem Material liefern. Die einzige Komplizierung, welche hierdurch zunächst eintritt, besteht darin, daß in der gesamten Mannigfaltigkeit möglicher stationärer Umsetzungen die Art der beteiligten Moleküle ebensowohl wechseln kann wie die Konzentrationen, mit denen sie im System vertreten sind.

Etwas schwieriger liegen die Dinge, wenn die äußeren Bedingungen oder Reize für bestimmte stationäre Reaktionen mehrerer Reaktionstypen zugleich, und zwar zugleich am selben Orte des somatischen Feldes gegeben sind. Es ist keineswegs selbstverständlich, vielmehr aus chemischen Gründen recht unwahrscheinlich, daß dann die verschiedenen stationären Umsetzungen sich abspielen, jede, als wären die übrigen nicht vorhanden[1]). Aber gerade für den Umstand, auf den es in diesem Zusammenhang allein ankommt, ergibt sich glücklicherweise keine prinzipielle Änderung: Die stationären Transformationen, welchen Charakter sie dann auch annehmen mögen, sind nach wie vor, sobald nur alle sonstigen Umstände die gleichen bleiben, durch die jeweils konstant gehaltenen Konzentrationen sämtlicher beteiligter Molekülarten vollkommen festgelegt, oder auch, und nun ganz allgemein:

---

[1]) Ich kann hier auf Ausführungen G. E. Müllers verweisen, a. a. O. **10**, 398 ff. und **14**, 180 ff. Für die Phänomenologie der Farben ist dies eine Angelegenheit oder Frage von der größten Bedeutung (vgl. das chemische Beispiel unten 99).

Jedem stationären Erregungszustand des somatischen Feldes gehören bestimmte Konzentrationen der beteiligten Substanzarten zu.

In den einfachsten Fällen werden die Konzentrationen mancher Molekülarten Null oder sehr angenähert Null sein und nur die eines einzigen Reaktionstypus in Betracht kommen wie in dem zuerst behandelten Falle. — Quasistationäre Erregungen (wie die bei konstanten Reizbedingungen) verlaufen als Abfolge nächst benachbarter stationärer Reaktionen unter ganz langsamer Änderung der vorhandenen Konzentrationen.

Ich erörtere die Frage nicht, wie „Qualitätenreihen" etwa des optischen Gebietes mit Reaktionstypen (Reaktionsreihen) in somatischen Feldern zusammenhängen, so nahe auch das Vorbild der Müllerschen Theorie ein Eingehen auf dies Problem legt. Der Grund für diese Zurückhaltung ist, daß die „bunten Erregungen", wie z. B. die des Violetts, sich wohl an den Molekülarten mehrerer Reaktionstypen zugleich abspielen, daß also die oben gestreifte Schwierigkeit auftritt: Weder die phänomenale Beobachtung noch chemische Gründe sprechen dafür, daß in einem solchen Falle stationäre „rote" und stationäre „blaue" Reaktion einfach und ohne wechselseitigen Zusammenhang am gleichen Orte verlaufen. Dagegen folgt aus der vorausgesetzten Natur der Erregung als einer stationären hier wie in anderen Fällen, und ohne Rücksicht auf das genannte Problem, daß eine individuelle Reaktion, die sich gleich bleibt und z. B. einem speziellen Violett entspricht, durch ganz bestimmte Konzentrationen der beteiligten Molekülarten charakterisiert ist. Dies aber ist alles, was für die folgenden Überlegungen gebraucht wird. Ein Eingehen auf die bunten Qualitätenreihen dagegen würde besondere Annahmen notwendig machen, und um den Schein zu vermeiden, als wäre das Weitere auf eine größere Anzahl von Voraussetzungen aufgebaut, lasse ich die Reihenbildungen bunter Farben beiseite.

Der Anschaulichkeit wegen kann man sich jedoch einer Reihe stationärer Reaktionen vom gleichen Typus, wie sie oben behandelt wurde, die Reihe tonfreier Farben vom Schwarz zum Weiß zugeordnet denken; dabei wäre anzunehmen, daß von diesem Transformationstypus beide Umsetzungsrichtungen im somatischen Felde wirklich vorkommen, die eine allerdings nicht durch einen „direkten Reiz" veranlaßt. — Ich glaube mit G. E. Müller, daß dieser Fall in der Tat so oder in ähnlicher einfacher Weise aufzufassen ist.

9. Die gegenwärtigen Kenntnisse von den Eigenschaften des Nervensystems erlauben noch einen wesentlichen Schritt über das bis hierher Gewonnene hinauszutun. Die Vorgänge in Nerven und nervösen Feldern haben in manchen Beziehungen so deutlich die Natur von Reaktionen in verdünnten Lösungen, daß sich ihre Behandlung in diesem Sinne immer mehr einbürgert. In der Meinung, der Erfolg der Betrachtungsart könnte noch größer sein, wenn man sie allgemeiner durchführte, übernehme ich sie für das Folgende und mit ihr diejenigen Konsequenzen, welche aus der Theorie der verdünnten Lösungen folgen. [Der Kolloidcharakter des Milieus stellt kein Hindernis hierfür dar, da Technik und Wissenschaft ja seit geraumer Zeit feste und halbfeste Lösungen mit flüssigen

Lösungen im engeren Sinne als nahezu gleichwertig behandeln und hierzu durch die vollkommene Analogie wesentlicher Eigenschaften durchaus berechtigt sind [1])].

Das wichtigste Lösungsmittel in Nerven und nervösen Feldern ist das Wasser. Da Wasser ein Lösungsmittel darstellt, in welchem die Aufspaltung von Molekülen in elektrisch geladene Ionen besonders hohe Beträge erreicht, so ist von vornherein zu erschließen, daß nervöse Substanz (wie übrigens lebende Substanz überhaupt) die gelöste Materie (Kristalloide) zu einem großen Teil elektrolytisch dissoziiert enthält. Eine Reihe von bekannten Erscheinungen, deren vielleicht wichtigste in späteren Abschnitten dieser Schrift von Bedeutung wird, lassen in dieser Hinsicht gar keinen Zweifel übrig.

Danach ist die Annahme berechtigt, daß auch an den stationären Umsetzungen in somatischen Feldern der betrachteten Art Ionenreaktionen einen wesentlichen Anteil haben, daß also (unter anderen) die Konzentrationen bestimmter Ionenarten auf bestimmten Beträgen erhalten werden, solange eine bestimmte Erregung oder Reaktion im Felde sich selbst gleich bleibt. — Unter Ionenreaktionen können dabei sämtliche Transformationen verstanden werden, an welchen überhaupt Ionen teilnehmen, also die Vereinigung eines Ions und eines Kolloidpartikels oder ihre Trennung ebensogut wie die gewöhnliche Spaltung von neutralen Molekülen in Ionen oder umgekehrt die Verbindung dieser zum Molekül, wie endlich das Entstehen und Zerfallen von sogenannten Molekülverbindungen, komplexen Ionen usw. [2]).

Damit sind die Voraussetzungen in der Hauptsache schon gegeben, auf denen die wesentlichen Schlußfolgerungen beruhen, und diese letzteren leiten sich aus den Prämissen durch einfachste Überlegungen ab. Die Voraussetzungen aber kann man kurz noch einmal dahin zusammenfassen:

Erregungen somatischer Felder bei konstanten äußeren Bedingungen sind quasistationäre chemische Reaktionen in verdünnten Lösungen, an welchen Ionen teilnehmen. Deshalb ist der Erregungszustand jederzeit hinreichend bestimmt durch ihm entsprechende Konzentrationen der reagierenden Molekülarten mit Einschluß der Ionen.

---

[1]) Vgl. Nernst, a. a. O., S. 454 f. — Von den spezifischen Eigenschaften der Kolloide zu sprechen, ist hier noch kein Anlaß.

[2]) Vgl. Nernst, a. a. O., S. 405 ff., 535 u. 576 f.

Zweites Kapitel.

Das elektrische Verhalten inhomogen erregter Felder.

10. Die Aufgabe, für Erregungszustände des somatischen Feldes eine Charakteristik zu finden, die jeden von ihnen individuell bestimmt, ergab sich aus der Hauptfrage, ob beim Übergang von räumlich homogener zu nicht homogener Felderregung ein den zweiten Fall auszeichnender Faktor auftreten kann oder muß. Diese Frage ist im positiven Sinne zu beantworten, und zwar auf Überlegungen hin, welche sich unmittelbar an die im vorigen Kapitel gegebene Charakteristik anschließen.

Das betrachtete Feld steht jedenfalls mit anderen Regionen des Nervensystems in funktioneller Verbindung. Richten wir uns zunächst nur auf die inneren Leistungen des Feldes, je nachdem ob es gleichartig oder räumlich ungleichartig erregt ist, so haben wir von den Wechselwirkungen abzusehen, die zwischen dem ganzen Felde und den übrigen Teilen des Nervensystems möglich sind und in der Regel auch wirklich stattfinden werden. Jene Wechselwirkungen können erst viel später berücksichtigt werden.

Man erkennt dann ohne weiteres, daß das durchweg homogen erregte Feld völlig unfruchtbar, d. h. außerstande ist, irgendein Geschehen über die stationäre chemische Reaktion hinaus zu entwickeln, die nach Voraussetzung in allen seinen Teilen gleichartig verläuft. Um welche von den möglichen Umsetzungen es sich auch handeln mag, in allen Elementen, in die wir uns das Feld zerlegt denken können, treffen wir dieselben Konzentrationen reagierender Substanzen und das gleiche Geschehen an. Daran wird nichts geändert, wenn der Vorgang sich im ganzen allmählich verschiebt. Solange er als quasistationär, d. i. als Abfolge benachbarter stationärer Zustände angesehen werden darf, gilt für jeden Augenblick das gleiche, und die Verschiebung selbst bringt ihrer Langsamkeit wegen noch keine besonderen Erscheinungen hervor, die über das bis hierher eingeführte Begriffssystem hinausgingen. Obwohl also die innere Energie und die Energietransformationen in einem jeden Feldteil unter Umständen sehr beträchtlich sein können, so fehlt doch jeder zureichende Grund für die Entstehung weiterer Prozesse zwischen jenen Teilen, da sich ja alle fortwährend in gleichem Zustand und untereinander im Gleichgewicht befinden. — Auch die elektrischen Ladungen der Ionen ändern hieran nichts. Denn da bei der elektrolytischen Dissoziation in Lösungen stets positive und negative Ladungen überall in gleichem absoluten Betrage auftreten, heben sich die elektrischen Wirkungen beider Elektrizitäts-

arten auf die Nachbargebiete gerade auf[1]). Für eine Verschiebung in der Ionenverteilung, die hieran etwas modifizieren könnte, ist keinerlei Anlaß, wenn die Konzentrationen der vorhandenen Ionenarten in allen Teilgebieten übereinstimmen; und das ist so lange der Fall, als nach Voraussetzung überall die gleiche stationäre Reaktion verläuft.

11. Hierbei wurde bereits stillschweigend angenommen, daß an und für sich die Natur des somatischen Feldes eine Einwirkung einzelner seiner Gebiete auf andere Teilgebiete wohl zulassen würde, daß also die Elemente des Feldes nicht wie vollkommen gegeneinander isolierte Miniatursysteme Nachbarn nur in rein geometrischer Hinsicht seien. Wäre dies der Fall, so müßte jede weitere Bemühung auf das uns gesteckte Ziel hin ein für allemal aufgegeben werden. Denn daß im betrachteten Felde bei irgend einer Reaktionsform von Teilgebieten neue Prozeßarten auftreten, ist nur dann physikalisch denkbar, wenn das Feld, als ganzes genommen, „ein System“ im Sinne der Physik und besonders der Thermodynamik darstellt, d. h. wenn seine einzelnen Teile aufeinander einzuwirken vermögen. Bloße geometrische Nachbarschaft der Feldelemente dagegen macht das ganze Feld nicht im mindesten zu einem „physikalischen System“, und wenn keine Wechselwirkung zwischen ihnen möglich ist, so haben sie bei größter geometrischer Nähe weniger miteinander zu tun als der Polarstern und der Sirius, die doch noch in schwachem Strahlungsaustausch stehen.

Bei dieser Lage der Dinge und bei der reichen anatomisch-physiologischen Erfahrung, die auf enge Verbindung von Feldteilen untereinander hinweist, kann die Wahl nicht zweifelhaft sein, und es handelt sich nur noch darum, welche Art von Verbindung und wechselseitiger Einwirkungsmöglichkeit wir zwischen Elementen eines somatischen Feldes anzunehmen haben, derart, daß das Ganze „ein System“ im physikalischen Sinne darstellt.

Zu Anfang wurde das schematische Feldbild in Zuordnung zur Sinnesfläche bestimmt: Unmittelbar benachbarten Elementen der Sinnesfläche sollten unmittelbar aneinandergrenzende Teile des nervösen Feldes entsprechen, so daß jeder stetigen Kurve auf jener auch ein stetiger Linienzug in diesem zugehörte. Um dieses rein geometrische Prinzip durch ein physikalisches zu ergänzen, haben wir nur die Natur der Felderregungen als chemischer Reaktionen in verdünnten Lösungen zu berücksichtigen. Die Einwirkungsweise benachbarter Lösungen aufeinander, auf die es da zunächst allein

[1]) „Die elektrischen Ladungen der Ionen spielen in der Thermodynamik so lange keine besondere Rolle, als die elektrischen Kräfte nicht in Konflikt mit den thermodynamischen Kräften kommen.“ (Planck, Thermodynamik, 3. Aufl. [französische Ausgabe], S. 240.)

ankommen kann, besteht in der Möglichkeit der Diffusion oder des Ausgleichs osmotischer Drucke (oder Partialdrucke), wie man in der Thermodynamik und Molekulartheorie einen und denselben Vorgang nach Belieben nennt[1]). Deshalb setzen wir zwischen den Elementen des betrachteten Feldes Verbindungen voraus, in denen der osmotische Druck von jedem Element zu seinen nächsten Nachbarn wirksam werden kann, und geben durch diese Annahme dem Gesamtfeld den Charakter eines physikalischen Systems. Über die Art der Verbindung, abgesehen von der allgemeinen hiermit festgelegten Eigenschaft, bleiben danach noch recht verschiedene Hypothesen möglich. Aber für den Kern der folgenden Ausführungen ist deren Wahl nicht mehr von Belang; alles Wesentliche folgt notwendig aus jener einen Eigenschaft.

12. Wird die Sinnesfläche räumlich inhomogen, aber überall für eine Weile konstant gereizt, so verlaufen ungleiche stationäre Reaktionen in verschiedenen Teilen des zugehörigen nervösen Feldes. Der Einfachheit wegen setzen wir für den Anfang voraus, es handle sich um nur zwei große Gebiete verschiedener Reizart auf der Sinnesfläche, die in einer beliebigen, aber kontinuierlichen Kurve aneinandergrenzen. Dann finden im nervösen Felde in zwei entsprechenden Regionen zwei verschiedene stationäre Reaktionen statt, und die beiden nervösen Teilfelder stoßen ebenfalls in irgendeinem stetigen Linienzug aneinander[2]). Verschiedene stationäre Reaktionen sind durch mindestens zum Teil ungleiche Konzentrationen reagierender Molekülarten charakterisiert. Der osmotische Partialdruck einer jeden Molekülart aber ist eine einfache Funktion der Konzentration eben dieser Substanz (in verdünnten Lösungen der Konzentration direkt proportional): also besteht eine Differenz osmotischer Partialdrucke längs der ganzen Grenzkurve beider Gebiete. Wären beiderseits nur elektrisch neutrale Moleküle vorhanden, so ergäbe sich hieraus in kurzen Zeiten nur eine minimale Diffusionsströmung der hier und dort ungleich konzentrierten Stoffarten. Handelt es sich außerdem wie im Nervensystem wesentlich um Reaktionen, an denen Ionen teilnehmen, und sind in den beiden Gebieten verschiedener Reaktion die Ionenkonzentrationen nicht vollkommen gleich, so entsteht sofort längs der ganzen Grenzkurve ein Sprung des elektrostatischen Potentials.

13. Will man sich über die Bedeutung dieses physikalischen Faktors hinreichend klar werden, der im Nervensystem inhomogen

---

[1]) Nernst, a. a. O., S. 153, sowie die Bemerkung S. 157 f.

[2]) Da das Feld eine Schicht von endlicher Dicke sein muß, so ist im Grunde von einer Grenzfläche zwischen ungleich erregten Feldregionen zu sprechen. Da kein Mißverständnis zu befürchten ist, behalte ich den Ausdruck „Kurve“ bei, der im folgenden die Anschauung erleichtert.

erregten Feldern gegenüber homogenen eigentümlich ist, so wird ein kurzes Eingehen auf die Grundlagen der Nernstschen Theorie galvanischer Elemente notwendig[1]). Soweit sie an dieser Stelle in Betracht kommt, leitet die Theorie die erfahrungsgemäß an den Grenzen zweier verschiedener Elektrolyte auftretenden Potentialsprünge aus der Diffusion der beiderseits ungleich konzentrierten Ionen qualitativ und quantitativ ab[2]).

Zwei einander berührende Elektrolyte können im einfachsten Falle Ionen ganz gleicher Art enthalten, die aber in beiden verschiedene Konzentrationen haben. Handelt es sich z. B. um einen binären Elektrolyten wie Salzsäure, die wir uns in sehr verdünnter Lösung als vollkommen dissoziiert denken dürfen, und grenzen zwei Lösungen dieser Säure aneinander, in denen die Konzentration verschieden ist, so diffundieren die Ionen von der Lösung höheren osmotischen Druckes (höherer Konzentration) zu der noch stärker verdünnten zweiten hinüber. Nun hängt aber die Geschwindigkeit, mit der unter sonst gleichen Umständen verschiedene Ionen wandern, unmittelbar von ihrer chemischen Natur ab, und beträgt z. B. für das Wasserstoffion im Beispiel (bei Zimmertemperatur) fast das Fünffache der Geschwindigkeit des Chlorions. Also würde $\overset{+}{H}$ bei der Diffusion beträchtlich voraneilen, wenn nicht bei der geringsten Verschiebung in diesem Sinne die mächtigen elektrostatischen Kräfte zwischen den entgegengesetzten Ladungen beider Ionenarten zur Wirkung kämen, $\overset{+}{H}$ zurückzuhalten, $\overset{-}{Cl}$ schneller vorwärts zu treiben suchten, und so eine Trennung beider in meßbaren Mengen verhinderten. Der geringe Vorsprung aber, den das Wasserstoff- vor dem Chlorion dennoch gewinnt, genügt immerhin, um die schwächer konzentrierte Lösung, in welche beide hineinwandern, relativ gegen die stärkere positiv aufzuladen. — Wäre das negative Ion das schnellere, so müßte der Sinn des Potentialsprunges in Zuordnung zur Konzentration sich umkehren.

Beide Elektrolyte können auch ganz verschiedene Ionen enthalten. „Bringen wir z. B. eine Lösung von Chlorwasserstoff und eine Lösung von Bromlithium miteinander in Berührung, so werden einerseits aus der ersten in die zweite mehr Wasserstoffionen als Chlorionen hineindiffundieren und so eine positive Ladung der zweiten bewirken; andererseits werden aus der zweiten Lösung in die erste wegen der größeren Beweglichkeit des Broms mehr Bromionen als Lithiumionen hineindiffundieren, wodurch die positive

[1]) Vgl. a. a. O., S. 396 ff. und 777 ff. Ich schließe mich eng an die Nernstsche Darstellung an.

[2]) In fast 30 Jahren haben die quantitativen Konsequenzen der Theorie eine weitgehende Bestätigung im Experiment gefunden.

Ladung der zweiten Lösung noch gesteigert wird.“ (Nernst, a. a. O., S. 779.) — Welchen Betrag die entstehende Potentialdifferenz erreicht, das wird auch in diesem Falle noch von den Konzentrationen in beiden Lösungen abhängen, und es verdient beachtet zu werden, daß auf diese Weise selbst zwei Lösungen gleichen osmotischen Totaldruckes an ihrer Grenze einen Potentialsprung erzeugen können, wenn nur irgendwelche Partialdrucke der gelösten und dissoziierten Moleküle beiderseits verschieden sind.

Den Beweglichkeiten der beteiligten Ionen müßten ganz spezielle Bedingungen im Verhältnis zu den Konzentrationen vorgeschrieben sein, wenn aus dem Zusammenwirken der elektrostatischen und osmotischen Kräfte trotz einer qualitativen Verschiedenheit der beiden Elektrolyte ein singulärer Nullfall sich ergeben sollte. In dem Nernstschen Beispiel ist nicht einmal das möglich: HCl und LiBr ergeben bei allen Konzentrationen eine elektromotorische Kraft.

Nach dem Bilde dieser beiden relativ einfachen Fälle, in denen die Lösungen zu beiden Seiten der Grenze nur je ein Ionenpaar enthalten, kann man sich leicht eine Anschauung von komplexeren Konstellationen machen, in welchen beide Lösungen eine größere Anzahl von Ionenarten aufweisen. So werden wiederum Potentialsprünge auf ganz ähnliche Weise entstehen, wenn z. B. beiderseits sowohl Chlorwasserstoff wie Lithiumbromid in Ionenspaltung, aber jedes mit verschiedenen Konzentrationen auf beiden Seiten gegeben sind usf.[1]).

14. Bei dieser Übersicht wurden die einander berührenden Elektrolyte als Lösungen schlechthin angesehen. Es ändert sich jedoch nichts, wenn an Stelle von unbeeinflußten Lösungen zwei Feldteile gesetzt werden, in denen zwei verschiedene Reaktionen stationär verlaufen oder sich quasistationär, also ganz langsam verschieben. Denn unter diesen Umständen sind für jeden Augenblick die beiden Gebiete des somatischen Feldes zwei verschiedenen sich berührenden Lösungen durchaus äquivalent und wie diese durch das Vorhandensein bestimmter Moleküle und Ionenarten in bestimmten Konzentrationen charakterisiert. Die Wanderungsgeschwindigkeiten der Ionen, die von ihrer chemischen Natur abhängen, und die Konzentrationen, mit denen sie in den Teilfeldern auftreten, legen also im betrachteten Falle ebenso wie zwischen anorganischen Lösungen Richtung und Betrag eines Potentialsprunges fest. Denn es wurde vorausgesetzt, daß im somatischen Felde ein Ausgleich osmotischer Druckunterschiede durch Diffusion möglich sei. — Insoweit die Umsetzung in beiden Feldteilen eine Ionenreaktion ist, findet man den Potentialsprung oder die elektromotorische

[1]) Der Fall ternärer Elektrolyte gibt nichts prinzipiell Neues gegenüber dem der binären.

Kraft an der Grenzkurve der beiden Erregungen von eben den Faktoren bestimmt, welche die stationären Erregungen selbst charakterisieren, nämlich von Natur und Konzentrationen der Ionenarten auf beiden Seiten. Oder auch: Die elektromotorische Kraft an der Grenze zweier verschieden erregter Feldregionen ist eine einfache Funktion der beiden Erregungszustände. — Da zwischen Teilgebieten homogener Felder keine Differenzen osmotischer Drucke (oder Partialdrucke) vorkommen, so fehlt in ihnen jeder Anlaß zur Ausbildung von Potentialsprüngen, und das Auftreten jener elektromotorischen Kräfte ist an Erregungsverschiedenheiten, an nichthomogene Felder gebunden.

Die Erregungen beiderseits sind aber auch das einzig Bestimmende für Richtung und Betrag der elektromotorischen Kraft. Der Potentialsprung wird weder von der Form und Ausdehnung der Berührungskurve beeinflußt, noch von der Form und Ausdehnung der Feldteile selbst; solange die Natur der beiden Erregungen dieselbe ist, können jene Faktoren beliebig verändert werden, und die elektromotorische Kraft bleibt doch die gleiche. Auch die bisherige Einschränkung auf zwei Teilfelder des Gesamtgebietes, die einander berühren, braucht deshalb nicht aufrechterhalten zu werden; die Physik lehrt, daß für jede Anzahl von Grenzkurven, die durch die Unterschiede zwischen den stationären Umsetzungen je zweier Feldgebiete gegeben werden, die gleiche Betrachtungsweise gültig bleibt. An allen Grenzkurven im Felde besteht eine elektromotorische Kraft, die von der Natur der jeweils benachbarten Erregungen bestimmt wird.

Wenn wie im Nervensystem die Reaktionen nur quasistationär sind, sich also mitsamt den für sie charakteristischen Konzentrationen ganz allmählich ändern, so hebt dieser Umstand die Potentialdifferenz zwischen je zweien von ihnen keineswegs auf. Ob und in welchem Betrage die elektromotorische Kraft dabei (überhaupt) variiert, das hängt von den Bedingungen des Einzelfalles ab und kann an dieser Stelle noch nicht erörtert werden.

Die Gebiete ungleicher Erregung sollten bisher in scharfer Grenzkurve aneinanderstoßen. Ich lasse vorläufig die andere (eben weniger wichtige) Möglichkeit inhomogener Felderregung beiseite, daß nämlich die Erregungsart in räumlich stetiger Weise variiert, und Nachbarteile des Feldes sich je um sehr wenig in ihrer Erregungsart unterscheiden, während doch entferntere Teile sehr verschieden erregt sein können. Die Nernstsche Theorie läßt sich jedoch auch auf diesen Fall anwenden.

15. Sollen elektromotorische Kräfte der angegebenen Art im Organismus und besonders im Nervensystem wirklich von funktioneller Bedeutung werden, so müssen sie auch bei recht kurz andauernden räumlich inhomogenen Erregungen sich ausbilden

können, und da Diffusion, die als erste Entstehungsursache der Potentialsprünge eingeführt wurde, ein sehr langsam verlaufendes Geschehen darstellt, so könnte der Einwand erhoben werden, für die Ausbildung der elektromotorischen Kräfte, die einer gegebenen Erregungsverteilung im Felde entsprächen, wäre im allgemeinen gar nicht genügend Zeit vorhanden. Die betreffenden Umsetzungen würden die meist recht beschränkte Zeit ihres Bestehens oft durchmessen haben, ehe noch die Potentialdifferenzen zwischen ihnen zur Ausbildung gekommen wären u. dgl. m. — Dieses Bedenken, welches berechtigt wäre, wenn es sich um Diffusion größerer Substanzmengen über bedeutende Entfernungen handelte, fällt ohne weiteres fort, sobald nur ein Diffundieren winziger (unwägbarer) Substanzbeträge über minimale Strecken erfordert wird wie in der Nernstschen Theorie. Ihre gerichtete Geschwindigkeit von einer Lösung zur anderen erhalten die Ionen im ersten Augenblick durch das Gefälle des osmotischen Druckes (Partialdruckes), und natürlich hat dieses Gefälle an der Grenze zweier Lösungen, wo der Partialdruck sich ganz abrupt ändert, im allgemeinen sehr beträchtliche Werte. Handelt es sich also um Entfernungen von der Größenordnung 10^{-7} cm, wie sie für solche „molekulare Verschiebungen" ungefähr in Betracht kommen, so würden diese unter dem Einfluß auch mäßiger Druckunterschiede in allerkürzesten Zeiten durchlaufen werden, obwohl die Beweglichkeit der elektrolytischen Ionen an und für sich sehr gering und z. B. viel kleiner ist als die von Luftionen. In der neueren Theorie der Wechselströme und Stromstöße in Elektrolyten wird denn auch ein Diffundieren schon bei Zeiten von der Größenordnung 10^{-4} sec als wirksamer Faktor vorausgesetzt; natürlich handelt es sich auch da um minimale Substanzbeträge und Verschiebungen, welche vielleicht in $\mu\mu$ zu messen wären [1]).

[Bisher wurde angenommen, abgesehen von aufgezwungenen Erregungsunterschieden sei das somatische Feld ein gänzlich homogenes Kontinuum. Besteht es in Wirklichkeit aus irgendwelchen morphologisch erkennbaren Elementarteilen, so brauchen die Verbindungen zwischen benachbarten dieser Mikroorgane, in denen die osmotischen Kräfte wirksam werden, nicht notwendig von ganz der gleichen chemischen Natur zu sein, wie die verbundenen Elementarteile selbst; sie könnten z. B. von Lösungen erfüllt sein, welche anderen Charakter und vielleicht keinen unmittelbaren Anteil an den Felderregungen haben, sie könnten halbdurchlässige Membranen, andere Lösungsmittel enthalten u. dgl. m. — Dann haben wir nur das eine Postulat aufzustellen, daß die Natur dieser Ver-

[1]) Vgl. Nernst, Pflügers Archiv usw. **122**, 275 ff., 1908.

bindungen (d. h. die in ihnen enthaltenen Lösungen und etwa Membranen) durch das ganze Feld hindurch im wesentlichen dieselbe sei. Die elektromotorische Kraft, die sich aus Erregungsunterschieden zwischen benachbarten Feldteilen ergibt, setzt sich in diesem Falle zusammen aus a) dem Potentialsprung an der Grenze von einem Feldelement und der Verbindung, b) dem Potentialsprung an der Grenze von Verbindung und zweitem Feldelement (in der anders erregten Region). Ist die Natur der Verbindung überall dieselbe, so bleibt auch hierbei die resultierende elektromotorische Kraft für den Erregungszustand in beiden Regionen charakteristisch, wenn schon sie im allgemeinen nicht dieselbe sein wird wie bei zwei unmittelbar kommunizierenden Lösungen. — Sie bleibt sich auch jetzt gleich, wann und wo immer zwei bestimmte stationäre Reaktionen in Nachbarelementen bestehen, und sie wird, wie man leicht sieht, wiederum Null, sobald die Erregungsart aller Elemente (des ganzen Feldes) dieselbe, das somatische Feld also homogen erregt ist; denn in diesem Falle heben sich die eben als a) und b) bezeichneten Potentialsprünge als gleich von Betrag und entgegengesetzt an Richtung gegenseitig auf. Das Entstehen wirksamer elektromotorischer Kräfte ist auch unter solchen Umständen ein Faktor, der Grenzkurven in nicht homogen erregten Feldern auszeichnet.]

16. Als ein spezieller Fall ist in den bisherigen Überlegungen bereits die Konstellation enthalten, daß ein Teil des Feldes durch periphere Reizung zu einer bestimmten Erregung gebracht wird, während das übrige Feld keine Beeinflussung erfährt. Dann kann die unbeeinflußte Feldregion entweder eine ihr eigentümliche Spontanerregung aufweisen[1]) oder als gänzlich unerregt anzusehen sein[2]). In beiden Fällen besteht kein Grund, ja keine Möglichkeit, das Feldgebiet mit einem Male prinzipiell anders zu behandeln als durch Reizung erregte Feldteile. Wir haben also auch das unbeeinflußte Feldgebiet als Lösung aufzufassen und als Konzentrationen der in ihm vorhandenen Molekül- und Ionenarten diejenigen anzusehen, welche eben im Zustande der Spontanerregung oder der Unerregtheit vorliegen. Es folgt, daß an den Grenzen zwischen peripher erregten und unbeeinflußten Feldteilen genau wie an denen verschieden erregter Gebiete elektromotorische Kräfte auftreten.

An dieser Stelle findet die theoretische Erwägung vollkommene Bestätigung durch die bekannte Erfahrungstatsache, daß nicht allein im Nervensystem, sondern so gut wie überall in lebender Substanz

---

[1]) So nach G. E. Müller in optischen Feldern.

[2]) Es gibt noch eine dritte Möglichkeit, die einer indirekten Erregung.

zwischen erregten Gebieten und unerregten Teilen elektromotorische Kräfte wirksam werden. So allgemein gilt ja diese Regel, daß man das „Negativwerden" der erregten Substanz gegenüber ihrer unerregten Umgebung als Grunderscheinung und sicherstes Kriterium des Lebens bezeichnet hat (Waller). Die von Hermann und Hering entwickelte „Alterationstheorie" für dieses Phänomen geht sogar von demselben Grundgedanken aus wie die hier wiedergegebenen Überlegungen: Ein protoplasmatisches Gebilde zeigt keine elektromotorische Wirksamkeit, solange das chemische Geschehen in ihm durchweg gleichartig bleibt; eine elektromotorische Kraft ist erst festzustellen, wenn das Gebilde inhomogen wird[1]). Wie von vornherein zu erwarten ist und natürlich auch aus der Nernstschen Theorie der Potentialsprünge hervorgeht, nehmen die elektromotorischen Kräfte zwischen erregten und unbeeinflußten Stellen mit dem Grade der Erregung in jenen zu; die Unterschiede in den Konzentrationen der beiderseits vorhandenen Ionenarten werden eben größer, je mehr sich die Erregung steigert und je stärker damit der Zustand des erregten Gebietes von dem der unbeeinflußten Regionen abweicht.

17. Die physiologischen Daten reichen weiter als die hier (für psychologische Zwecke) gewählte Ableitung, insofern sie zeigen, daß auch auf nicht nervöse Systeme, wie z. B. Muskeln, die gleichen Gedanken sehr wohl angewendet werden könnten[2]). In anderer Hinsicht aber scheint die Tragweite der auf nervöse Felder übertragenen Nernstschen Theorie sich beträchtlich weiter zu erstrecken.

Das Negativwerden erregter lebender Substanz gegenüber unbeeinflußten Teilen stellt nur einen, wenn schon den empirisch bereits untersuchten Spezialfall dar. Nach der Theorie tritt ein Potentialsprung viel allgemeiner bei allen möglichen Arten von Erregungsverschiedenheiten in kommunizierenden Gebieten auf. Und zwar kommt dabei Unterschieden, welche auf verschieden starke Reizung zurückgehen, keinerlei Vorrang gegenüber solchen rein qualitativer Art zu. Wäre es also möglich, im somatischen Feld Reaktionen verschiedener Typen (vgl. oben 8) ohne Rücksicht auf diese qualitative Natur rein „der Intensität nach" zu bestimmen, und stellte man dann zwei benachbarte Erregungen ganz gleicher „Intensität", aber verschiedener Typen nebeneinander her, so müßten auch diese an der Grenzkurve einen Potentialsprung zeigen, der von der qualitativen Verschiedenheit der beiderseitigen Reaktionen abhinge. — Die geläufige Formulierung ist danach auch

---

[1]) Landois, Physiologie II, S. 584 (13. Aufl.).

[2]) Nach von Frey (Nagels Handb. d. Physiol. IV, 2, S. 524 ff.) ist diese Anwendung bereits erfolgt.

in anderer Hinsicht zu eng und deshalb etwas irreführend: Die erregte Stelle soll negativ werden gegenüber allen unerregten, und das ist an sich Tatsache; man kann daraus noch folgern, daß im allgemeinen die stärker erregte Region negativ sein wird gegenüber der gleichartig, aber schwächer erregten. Wenn aber die Verschiedenheit rein qualitativer Natur und jeder „Intensitätsunterschied" ausgeschlossen ist, dann entbehrt die Behauptung, gerade die stärker erregte Zone werde negativ gegenüber der Umgebung, jedes bestimmten Sinnes. Es bleibt richtig als Erfahrungstatsache und wesentlich für spezielle Ausgestaltungen der biologisch-elektrochemischen Theorie, daß in Reihen eines und desselben Reaktionstypus, wie sie in der Regel durch Variation der Reizstärke erzeugt werden, der vom stärkeren Reiz hervorgerufenen Erregung sehr allgemein gerade die relative Negativität zukommt, und das in den allerverschiedensten protoplasmatischen Gebilden. Aber wo es sich gar nicht um Intensitätsdifferenzen (auch nur der Reizung) zu handeln braucht, in Feldern also, die mehrerer Erregungstypen fähig sind, da darf man dem Feldteil, der negativ wird, darum allein noch keinen Vorrang einräumen. Dann können vielmehr in der Berührungskurve zwei ganz gleichberechtigte, qualitativ verschieden erregte Teilfelder aneinandergrenzen, deren eines positiv, deren anderes negativ ist. — An dieser Überlegung wird nichts geändert, wenn es in manchen Fällen unmöglich sein sollte, zwei artverschiedene stationäre Reaktionen sinnvoll und eindeutig ihrer „Intensität" nach zu vergleichen oder gleichzumachen. Denn kann man das gar nicht, so ist in einem solchen Fall die Redeweise erst recht irreführend, die dem stärker erregten und damit dem negativen Feldgebiet einen besonderen Wert beimißt, während doch aus Beweglichkeiten und Konzentrationen der beiderseits vorhandenen Ionenarten auch unter diesen Umständen Betrag und Richtung der elektromotorischen Kraft eindeutig abzuleiten wäre.

Hielte man trotzdem daran fest, daß das negative Gebiet das „stärker" erregte sei, so wäre das nichts anderes als eine (vorläufig vollkommen willkürliche) Definition. — Weshalb in einer Reihe artgleicher Erregungen unter verschieden starkem Reizeinfluß das intensiver gereizte Gebiet gerade negativ zu werden pflegt, ist nicht bekannt und muß mit einer überall wiederkehrenden Eigenschaft der verschiedensten protoplasmatischen Gebilde zusammenhängen. Allerdings gibt es eine Tatsache, die bei Reizung etwa ebenso regelmäßig wiederzukehren scheint wie das Negativwerden gegenüber der unbeeinflußten oder (im gleichen Typus) schwächer beeinflußten Umgebung, das ist das Auftreten saurer Reaktion, also das Freiwerden von Wasserstoffionen. Macht man nun die Annahme, die allerdings wenig Hypothetisches hat, daß mit steigender Reizung die Anzahl freier Wasserstoffionen immer mehr anwächst, so erklärt sich das Negativwerden der stärker oder der überhaupt gereizten Region sehr einfach dadurch, daß

das Wasserstoffion bei weitem das beweglichste von allen ist. Denn dann ist die ausschlaggebende Diffusion notwendig die eben dieses Ions, das allen anderen vorauseilt, und zwar nach der schwächer oder gar nicht erregten Umgebung hin, wo der Partialdruck dieser Ionenart nach Voraussetzung schwächer ist. Die Folge ist eine positive Aufladung der gar nicht oder schwächer erregten Gebiete und natürlich zugleich ein Negativwerden der stärker oder überhaupt gereizten Zone. Gerade das ist die zu erklärende Erscheinung. — (Sobald das Nachbargebiet eine qualitativ andere Reaktion durchmacht, kommt man auch bei dieser Überlegung dazu, die berühmte Regel des Negativwerdens stärker erregter Gebiete für etwas einseitig formuliert zu halten.)

Die experimentelle Elektrophysiologie hat bisher meistens Fälle bearbeitet, in denen zwischen Nachbargebieten nur Erregungsunterschiede intensiver Art (genauer: verschiedene Erregungen eines Typus) ohne weiteres herzustellen waren, und hat dabei den spezielleren Satz von der „Negativität der erregten Gebiete" gefunden. Es sind ihr jedoch an und für sich auch andere Konstellationen zugänglich, und sobald in einem somatischen Feld benachbarte Erregungen qualitativ verschiedener Typen hervorgerufen werden, müßten sich die allgemeineren Konsequenzen der Theorie schon sozusagen aus logischen Gründen experimentell bestätigen, d. h. es müßten Fälle auftreten, wo das relativ negative Gebiet vor dem positiven Gebiet nichts voraus hat[1]).

18. Das Auftreten elektromotorischer Kräfte an lebender Substanz ist recht genau untersucht und zur Erkenntnis der Lebensfunktionen verwendet worden, wo es dem Experiment leicht zugänglich war, also an den Muskeln mit Einschluß des Herzens, an Nervenbahnen, vor allem motorischen, an der Retina und an den Organen (Wurzeln, Blättern) von Pflanzen. Relativ wenig bekannt, ja zum Teil noch durchaus unberücksichtigt sind dagegen (trotz der wertvollen Feststellungen an der Retina) diejenigen Fälle geblieben, auf die es dem Psychologen in erster Linie ankommen muß: die Fälle inhomogener Erregung in somatischen Feldern, welche eine Raumfunktion besitzen.

Entspricht einem quantitativen oder qualitativen Erregungsunterschied in benachbarten Feldteilen nach der oben gegebenen Ableitung ein Potentialsprung an der gemeinsamen Grenze der Gebiete, so kann man hieraus eine Reihe von Folgerungen ziehen:

---

[1]) Da die Retina bei Belichtung recht starke elektromotorische Kräfte entwickelt, so ist der nächstliegende Versuch der, benachbarte und ähnlich gelegene Netzhautfelder simultan mit qualitativ ungleichen, aber nach Möglichkeit gleich intensiven Lichtern zu bestrahlen, und das gegenseitige elektromotorische Verhalten der Gebiete festzustellen. Man pflegt die Retina einfarbig zu belichten und dann von Cornea und Bulbushinterwand abzuleiten. Über die Natur der verschiedenen Farberregungsarten würden auch Versuche der eben vorgeschlagenen Art gut Auskunft geben.

A. Nervöse Felder, welche von Druck-, Schmerz- und Temperaturreizen erregt werden, weisen elektromotorische Kräfte auf, wenn Teilgebiete der gesamten Sinnesfläche gereizt werden oder die Reizungsart aneinandergrenzender Gebiete ungleich ist. — Jeder Kontur im Tastfelde entspricht ein Potentialsprung (oder ein steiler Potentialabfall), und wird z. B. eine geschlossene Fläche oder die Spitze eines Tastzirkels auf die Haut gedrückt, so ist das Erregungsgebiet eines zugehörigen nervösen Feldes von der Umgebung überall, also in geschlossener Umgrenzung, durch eine Differenz des elektrischen Potentials abgesetzt. — Diese Folge einer lokalisierten Berührung oder allgemeiner: Reizung der Körperoberfläche ist als ebenso notwendig anzusehen wie das Auftreten der „absoluten Erregungen“ selbst, die unmittelbar den Reizen entsprechen.

B. Sind diejenigen nervösen Gebiete, welche von der Reizung des linken und rechten Labyrinthes unmittelbar erregt werden, nicht raum- und material-identisch, wohl aber in dem Sinn verbunden, wie in 11 angegeben ist, besteht also die Möglichkeit osmotischer Kommunikation, — dann treten zwischen jenen Gebieten elektromotorische Kräfte auf,

α) sobald die statischen Labyrinthe links und rechts irgendwie ungleich erregt werden,

β) sobald die akustische Erregung in einer Schnecke sich von der in der anderen unterscheidet. Die häufigste Verschiedenheit, die vorkommen wird, ist eine Intensitätsdifferenz bei Schallreizen, die nicht aus der Medianebene des Kopfes stammen. (Allenfalls ist noch an Phasendifferenzen links und rechts zu denken.)

Sollten die in Betracht kommenden Feldgebiete des linken und rechten Labyrinthes räumlich weit voneinander entfernt, aber in osmotischem Sinne verbunden sein, so ergibt die Erregung links einen Potentialsprung gegen die unbeeinflußte Zwischenverbindung, die Erregung rechts gegen eben diese Verbindung einen zweiten Potentialsprung, und bei Ungleichheit der beiden Erregungen ist das Gesamtresultat eine elektromotorische Kraft zwischen den beiden Erregungsgebieten trotz ihrer geometrischen Entfernung (vgl. oben 15).

Ob derartige Wirkungen auch zwischen ungleich erregten Feldgebieten eines Labyrinthes vorkommen, hängt von der Natur dieser Felder ab und kann noch nicht untersucht werden. Überhaupt bedürfen die Erregungen der Labyrinthe zunächst einer gesonderten Betrachtung, ehe weitere Schlüsse möglich werden. Dergleichen liegt nicht im Plan dieser Schrift.

C. Bei weitem die wichtigsten Fälle ergeben sich bei der Anwendung auf nervöse Felder des optischen Sektors. Als ein solches Feld muß außer den sogenannten zentralen Gebieten auch die Retina angesehen werden, die ja weniger ein „peripheres Sinnesorgan“ (wie z. B. die Schnecke) als ein speziell umgebildeter Gehirnteil ist.

Konturen im Gesichtsfeld sind Linienzüge, in denen, physiologisch gesprochen, zwei in irgend einer Weise verschiedene Farberregungen aneinandergrenzen. Also entspricht jeder gesehenen Kontur eine elektromotorische Kraft im nervös-optischen Felde, und zwar längs ihrer ganzen Erstreckung. Betrag und Richtung des Potentialsprunges sind dabei von der Natur der sich berührenden Farberregungen bestimmt. Wenn die beiden Farben einander qualitativ immer näher kommen und sich schließlich gleich werden, verschwindet die elektromotorische Kraft, und ebenso verschwindet die Kontur.

Daß gesehene Konturen durch irgend einen sehr realen Faktor physisch ausgezeichnet sein müssen, nicht einfach die Kurven darstellen, in denen zwei verschiedene Farben geometrisch aneinandergrenzen, scheint zuerst Panum bemerkt zu haben, als er über Wettstreit der Sehfelder und Konturenprävalenz bei diesem Vorgang experimentierte. Er kam zu dem Schluß, „daß die Konturen die Retina besonders stark reizen, und daß die Nervenerregung, die durch sie hervorgebracht wird, eine andere und weit kräftiger ist als diejenige, welche durch eine gleichmäßig erleuchtete Fläche gesetzt wird“ [1]).

Wettstreit ist nur ein vereinzelter, unter Laboratoriumsbedingungen zu beobachtender Fall von unmittelbar durch Konturen bestimmtem oder beeinflußtem Geschehen. Aber die räumliche Variation der Erregungsart im Felde bedingt unser Sehen in jedem Augenblick und in entscheidender Weise.

Im Gesichtsfelde auftretende Formen oder Figuren werden von ihrer Umgebung durch Farbenunterschiede oder Konturen abgegrenzt. Die flächenhaften Formen können zu schmalsten Bändern (Linien) oder Punkten zusammenschrumpfen, die andere Farben haben als der „Grund“. Ganz unabhängig von allen solchen Modifikationen entspricht den umschließenden Rändern jeder Form, und zwar für den gesamten Verlauf dieser Unstetigkeitskurve der Erregung, eine elektromotorische Kraft. Bei jeder Gestaltwahrnehmung enthält das optische Feld Potentialsprünge längs der maßgebenden Grenzen.

Diese Gesetzmäßigkeit ist nicht an den Fall einer Wahrnehmung ruhender Gestalten gebunden. Die Arten inhomogener Erregung des optischen Sektors, welche zu dynamischen Phänomenen Anlaß geben, müssen ebenfalls an den Grenzen der einzelnen Farbgebiete Potentialsprünge erzeugen, und dasselbe gilt vom taktilen Sektor. Aber es handelt sich dann nicht mehr um stationäre Erregungen,

---

[1]) Physiol. Unters. über das Sehen mit zwei Augen, 1858, S. 47 (zitiert nach Nagel, Handb. d. Physiol. III, 2 [Zoth]).

und folglich treten, wie in der phänomenologischen Beobachtung, auch in der Theorie der physischen Felder ganz neue Momente auf, die hier nicht behandelt werden können.

Mit Ausnahme des Pupillenreflexes werden fast alle Augenbewegungen von Konturen in irgendeiner Weise bestimmt und gelenkt; sie fallen so aus, daß gewisse Bedingungen erfüllt werden, welche sich auf die Konturen im einzelnen oder im Doppelauge beziehen. An diesen für die Motorik irgendwie maßgebenden Grenzen sind die Potentialsprünge lokalisiert, und jede ausgeführte Bewegung bedeutet umgekehrt eine Verschiebung der Orte elektromotorischer Kraft, oder wie die Akkommodation sogar eine Änderung des Potentialgefälles.

Daß die elektromotorisch wirksamen Konturen im gemeinsamen Teil beider Gesichtsfelder doppelt auftreten, hat so lange keine irgend auffallenden Folgen, als jene Grenzen verschiedener Erregungsarten auf sogenannten identischen Stellen beider Netzhäute physiologisch primär entstehen. Sind die Abbildungsbedingungen dagegen derart, daß Potentialsprünge links und rechts von dieser ausgezeichneten gegenseitigen Lage im Gesamtsystem abweichen, so kann eine fundamentale Änderung im Gesichtsfeld erfolgen; aus eben-frontalparallel gesehenen werden plastische Gestalten; beschränkte homogene Flächen, deren begrenzende Potentialsprünge in den beiden Teilen des optischen Sektors „parallaktisch verschoben“ sind, liegen irgendwie „schräg“ im phänomenalen Raum.

Die Umwelt des Menschen ist in ausgezeichnetem Maß eine Sehwelt, und die Dinge, mit denen wir zu tun haben, sind wesentlich optisch für uns charakterisiert. Jedes Sehding aber, das natürlicherweise und selbständig als solches erscheint, ist uns als optische Gesamtform innerhalb begrenzender Konturen und Flächen gegeben und durch sie gegen seine Umgebung abgesetzt. Je weniger diese Abgrenzung realisiert ist, desto geringer wird im allgemeinen unsere Neigung, ohne weiteres von einem selbständigen Ding zu reden. Also treten an den Grenzen jedes sich kompakt von seinem Milieu abscheidenden Dinges im nervös-optischen System elektromotorische Kräfte auf.

Nach alledem ist es auf jeden Fall unzulässig, den Komplex physischen Geschehens, der einem gegebenen Gesichtsfeld entspricht, als ein Mosaik der einzelnen Erregungen von rein geometrischer Verteilung und Nachbarschaft zu behandeln. Es geht mehr vor in den somatischen Feldern.

19. Solche Konsequenzen hätten auch auf kürzerem Wege gefunden oder doch wahrscheinlich gemacht werden können, wenn

wir von dem Auftreten elektromotorischer Kräfte zwischen erregten und unerregten Teilen der lebenden Substanz ausgegangen wären, wie es die Physiologie konstatiert, und durch eine weitgehende Verallgemeinerung nur dieser Erfahrung ohne eigentlichen Nachweis den Satz aufgestellt hätten: jede Erregungsverschiedenheit in benachbarten somatischen Teilfeldern führe zu Sprüngen des elektrostatischen Potentials an den gemeinsamen Grenzen. Abgesehen von der geringeren Sicherheit einer solchen Ableitung veranlaßte zu einer genauen physikalischen Überlegung der Wunsch, die elektromotorischen Kräfte in nicht homogenen Feldern von jedem spezifisch biologischen Charakter frei darzustellen. In der Tat enthält der vorliegende Nachweis an keinem Punkte, der gerade für die Entstehung der Potentialsprünge in Betracht käme, andere als rein physikalische Begriffe; diese selbst sind nie in einem bloß analogischen Sinn gebraucht, sondern — soviel ich beurteilen kann — stets ihrer physikalischen Definition gemäß, und der ganze Gedankengang kann nicht für ein künstliches Gebilde gelten, willkürlich zurecht gemacht, um einer psychologischen oder biologischen Beobachtung nachher zu entsprechen. Die von biologischen und gar psychologischen Rücksichten ganz unabhängige Nernstsche Theorie elektromotorischer Kräfte zwischen Elektrolyten ließ sich vielmehr unverändert auf die jeweiligen Zustände ungleichartig erregter nervöser Felder übertragen, sobald die wesentliche Grundlage der Farbenlehre von G. E. Müller in geeigneter Weise, aber der physiologischen Erfahrung gemäß näher präzisiert war.

Drittes Kapitel.

Der erste physische Gestaltfaktor.

20. Es war ein Faktor zu ermitteln, der inhomogen erregte nervöse Felder gegenüber homogenen auszeichnet. Daß dieser Faktor physikalischer Natur und Herkunft ist, hat für die eigentliche Aufgabe der Untersuchung deshalb wesentliche Bedeutung, weil man ihn als eine einfachste Gestalteigenschaft der betreffenden Systeme erkennt.

Im folgenden kommt es nicht mehr darauf an, eine physikalische Erscheinung an und für sich, im rein naturwissenschaftlichen Sinne, zu verstehen und zu übernehmen, wie der Fachmann sie uns lehrt, sondern als mühevollere Aufgabe liegt die Erörterung vor, wie alte und scheinbar sehr klare allgemeine Vorstellungen auf der einen Seite, und neue, noch unsichere und schwankende

Begriffe auf der anderen sich zu der physikalischen Erscheinung verhalten. Kategorien sollen, wenn sie richtig getroffen sind, sofort die wesentlichen Formen gegebener Denkgegenstände zu sehen erlauben, während zugleich das Individuelle der Objekte jedesmal wie selbstverständlich und zwanglos die vorgezeichnete allgemeine Form erfüllt. In unserem Falle wird sich zeigen, daß die üblichen Begriffe das nicht leisten, und daß sie der angeblichen Klarheit und Eindeutigkeit durchaus entbehren. Auch die neuen Vorstellungen erlauben noch keine vollkommen genügende Darstellung des gegebenen Materials, aber sie sind noch bildsamer, und es bleibt die Hoffnung, wenn erst die Realität und der logische Wert des Problems verstanden sind, dann werde mit der Zeit die Korrektur der alten und die scharfe Formung der neuen Kategorien zugleich gelingen. — Versuchen wir, von einer Frage aus, die vielleicht selbst noch ungeschickt gestellt ist, wenigstens die etwas unerfreuliche Situation zu überschauen und ihr dabei so viel Positives zu entnehmen, wie eben bei einer ersten Orientierung gelingen will: Lassen sich die charakteristischen Eigenschaften der untersuchten physischen Gebilde aus artgleichen Eigenschaften von Teilen zusammensetzen?

Elektromotorische Kräfte bestehen (im hier zu untersuchenden Falle) zwischen zwei Elektrolyten von verschiedenen Materialeigenschaften. Wenden wir übliche Begriffe an, so werden wir für „Teile“ des Systems die beiden Lösungen halten, werden die elektrischen Eigenschaften der Teile und die des ganzen Systems betrachten und prüfen, wie sich die physische Natur des Gebildes zu unseren Kategorien und zu unserer Frage stellt.

21. Wer von vornherein überzeugt ist, jede physikalische Erscheinung müsse als die Summe oder allgemeiner Resultante von gleichartigen Partialerscheinungen an Teilen angesehen werden, der kann im Sinne dieser verbreiteten Anschauung sogleich weiterfragen, ob denn der Ausdruck „Differenz des elektrischen Potentials“, der bisweilen anstatt des Terminus „elektromotorische Kraft“ gebraucht wurde, die im algebraischen Sinne additive Natur der Erscheinung nicht direkt bezeichne. Die Erfahrung lehrt, daß eine solche Meinung, so wunderlich sie dem Physiker vorkommen mag, in unserem Zusammenhang notwendig zu erörtern ist. (Denn sonst wäre gar kein Nachweis mehr erforderlich, daß in der Physik Erscheinungen mit Gestalteigenschaften auftreten.)

Es gibt nichts Gefährlicheres als Worte: Die beiden Elektrolyte weisen eine Potentialdifferenz auf. Differenzen, könnte ein Logiker sagen, sind quantitative Unterschiede zwischen zwei Beträgen, von denen der eine einer Größe, der andere einer zweiten Größe zugehört. Die eine Lösung des Systems hat zweifellos ein

bestimmtes Potential, die zweite ein anderes, zwischen beiden Potentialen besteht der entsprechende algebraische Unterschied und stellt eine Eigenschaft des sogenannten Ganzen dar, welche sich aus artgleichen Eigenschaften der Teile klar ergibt; die alten Begriffe genügen also vollauf, um dieses physikalische Beispiel zu verstehen. Damit ist der Fehlschluß fertig. Und niemand, welcher der Meinung ist, alle physikalischen Gebilde seien „Undverbindungen", darf ihn als eine Unterschiebung zurückweisen; denn entweder beruht diese Meinung gar nicht auf einem genaueren Durchdenken solcher einzelnen physikalischen Beispiele, dann ist sie recht wenig wert, oder aber sie muß so begründet werden.

Der Fehler kommt durch Mehrdeutigkeit der Begriffe zustande. Man sieht das sofort, wenn man einen Fall vergleicht, wo die Überlegung zuträfe. Wir betrachten noch immer die Elektrolyte und wiegen einen jeden; nachher wiegen wir beide zusammen und finden als Gewicht des Ganzen genau die Summe der beiden Einzelgewichte. Hier ist kein Zweifel: die physische Eigenschaft des Ganzen setzt sich aus artgleichen Eigenschaften der Teile einfach zusammen. Aber im Fall des elektrischen Problems liegen die Dinge ja ganz anders; denn die „Potentialdifferenz" zwischen den beiden Lösungen ist durchaus nicht die Differenz zweier bestimmter Potentialwerte, von denen der eine der ersten, der andere der zweiten Lösung auch selbständig zukäme; sondern die „Differenz" bildet sich erst in dem Augenblick aus, wo die beiden in physischen Zusammenhang kommen. Angenommen, sie wären vor der Berührung auf genau gleichem elektrostatischen Potential gewesen, so ergibt sich doch infolge der Vereinigung immer derselbe Potentialsprung. Es ist einfach physikalisch falsch, daß die Potentialdifferenz des Systems sich aus den Potentialen der Teile ergäbe, und vielmehr das Umgekehrte ist zutreffend: Weil sich im physisch kommunizierenden Gesamtsystem eine bestimmte Potentialdifferenz ausbilden muß, deshalb nehmen die beiden Elektrolyte die unter den gegebenen Umständen der Differenz entsprechenden Potentialwerte an. Das, was in jenem Fehlschluß als algebraische Resultante fälschlich hingestellt wird (weil hierzu das Denken ohnehin neigt, und weil das Wort „Differenz" dazu verführt), ist primäre Eigenschaft des Gesamtsystems, und dieser gemäß bilden sich die absoluten Potentialwerte der Teile (der Lösungen) aus.

Wenn nur die sogenannte Potentialdifferenz, die wir nun aus guten Gründen weiterhin stets als elektromotorische Kraft oder auch als Potentialsprung bezeichnen wollen[1]), primär aus den

[1]) Der Sprachgebrauch ist hier nicht ganz fest.

Systemeigenschaften hervorgeht, und der Fehlschluß also nicht etwas immerhin auch Denkbares behauptet, sondern in der angegebenen Art die physische Realität umgekehrt hat, dann folgt, daß die Systemeigenschaften überhaupt nur diesen Potentialsprung erfordern, daß dagegen die absoluten Potentiale[1]) dabei noch ganz verschiedene Werte haben können. Und auch das ist vollkommen richtig; denn wenn wir das Gesamtsystem mit dem seinen Eigenschaften entsprechenden Potentialsprung nunmehr in irgendwelcher Weise auf ein hohes, niederes, positives oder negatives „elektrostatisches Niveau" zu bringen suchen, so lassen sich wirklich die absoluten Potentialwerte der beiden Lösungen beliebig verändern, aber der Potentialsprung zwischen ihnen bleibt immer der gleiche; und dasselbe hätten wir auch vor ihrer Vereinigung vornehmen können, ebenfalls ohne die nachher entstehende elektromotorische Kraft zu beeinflussen.

Rein formal und rechnerisch ist es richtig, daß die elektromotorische Kraft der Differenz der beiden Einzelpotentiale gleich ist, aber nicht etwa, weil diese, physisch zuerst selbständig an den Teilen gegeben, eben dieses algebraische Resultat lieferten, sondern weil die sonstigen Eigenschaften des ganzen kommunizierenden Systems (Konzentrationen, Ionenbeweglichkeiten) die Potentiale beider Teile zugleich stets so bestimmen, daß ihre Differenz in dem Ganzen (elektromotorische Kraft) bei sonst beliebigen absoluten Werten einen bestimmten Betrag annimmt. Dieser Sachverhalt ist in der Tat das Gegenteil von einer Bestimmung der Systemeigenschaften aus gleichartigen, für sich vorhandenen Eigenschaften der Teile. — Hierüber läßt sich nicht diskutieren, sondern jeder Widerspruch würde einen physikalischen Fehler involvieren. Was wir da vornehmen, ist auch durchaus keine Begriffsspalterei, sondern wir bemühen uns, anstatt einer oberflächlich-begrifflichen und sachlich verkehrten Behandlung von physisch Realem aus der Ferne eine Anerkennung seines höchst konkreten Charakters einzuführen, so wie die Physik aus der Nähe aussieht.

Wir finden also: Wenn in zwei Lösungen die Partialdrucke irgendwelcher Ionenarten ungleich sind, so bilden die Lösungen zusammen (bei osmotischer Kommunikation) ein Ganzes mit einer charakteristischen elektrischen Systemeigenschaft, welche aus artgleichen Eigenschaften der Teile nicht abgeleitet werden kann, sondern umgekehrt die elektrischen Eigenschaften der Teile (bis auf eine additive Konstante) bestimmt.

---

[1]) Das soll bedeuten: Potentiale der Lösungen relativ zu einem neutralen Normalpotential wie dem der Erde.

Noch einmal ist daran zu erinnern, daß es sich eben nicht um die physikalischen Tatsachen als solche handelt. Wenn ein Philosoph einwendet: Nun, daß jene elektromotorische Kraft nicht die Differenz zweier sonst schon bestehenden Potentiale ist, das haben wir schon immer gewußt, — so wäre das natürlich von vornherein zugegeben. Aber es ist ein Unterschied, ob man während des Studiums physikalischer Werke oder in Vorlesungen nur hiervon als einem physikalischen Faktum Kenntnis genommen hat, oder ob man außerhalb sozusagen des rein physikalischen Milieus, bei einem allgemeinen philosophischen Überblick über die unbelebte Natur und in der allgemeinen Lehre von den Kategorien des Physischen wirklich irgendwelche Rücksicht auf diese Kenntnis nimmt. Denn leider pflegt bei prinzipiellen Betrachtungen und Untersuchungen der Philosophie durchaus nicht alles, was wir irgendwie „wissen", denjenigen Einfluß auf unser Denken und seine Ergebnisse zu haben, der ihm sachlich eigentlich zukäme. Die Kategorien kann man entweder zu finden suchen, indem man mitten in den verschiedenen Erfahrungsbereichen die typischen Formen der Gebilde in Augenblicken glücklichen Hinschauens zu erfassen sucht, oder aber, indem man von außen und weitab Klärung von Grundbegriffen ganz im allgemeinen anstrebt. Die meisten Vertreter der systematischen Philosophie scheinen gegenwärtig die zweite Methode vorzuziehen, und auch sie hat wohl ihre Vorzüge. Aber daß Kategorien, die hierbei gefunden werden, notwendig ein vollständiges System bilden, und daß die einzelnen sich nachher überall scharf in konkreten Fällen anwenden lassen müßten, dafür besteht keine Garantie. So kann der Philosoph beispielsweise sehr wohl wissen, welches die physikalische Natur einer elektromotorischen Kraft zwischen zwei Lösungen ist, und zugleich kann es bei seiner Arbeitsweise im möglichst Allgemeinen und Abstrakten doch höchst unwahrscheinlich sein, daß dieses Wissen auf die zu entwickelnde Kategorienlehre einwirkt. Voraussetzung hierfür wäre doch, daß die elektromotorischen Kräfte dem Philosophen während seiner physikalischen Studien schon durch ihre Eigenschaften philosophisch aufgefallen wären.

22. Sobald man dem physikalischen Tatbestand diesen Charakter gewissermaßen abgelesen hat, stellen sich logische Schwierigkeiten ein. Das System hat in einer Weise die beiden Lösungen zu „Teilen", es ist kein untrennbares Ganzes; denn ich kann es ja „zerlegen" und ich habe es auch „zusammengesetzt". Es hat die Lösungen zu Teilen z. B. auch insofern, als sein Gewicht die Summe der Gewichte der Lösungen ist und in solche Teilgewichte wieder auseinandergenommen werden kann. Wenn ich aber (realiter) von den Teilen zum Ganzen übergehe oder von dem Ganzen zu den Teilen, so findet jedesmal eine bedeutende physische Änderung statt. Und daß sollte doch wohl eigentlich bei einer reinen Teilung oder reinen Summenbildung nicht sein. Vor der Vereinigung der Teile besteht keine elektromotorische Kraft, und elektrostatische Potentiale der Teile vor der physischen Kommunikation haben nichts mit dem Potentialsprung im Ganzen zu tun; trenne ich das System in die Teile, so gibt es wieder die elektromotorische Kraft nicht mehr. Ist das Gesamtsystem eine Summe oder nicht, sind die Lösungen Teile oder nicht? Oder brauchen wir diese Worte, die doch als Termini für klar

bestimmte Kategorien auch des Physischen gelten, am Ende mit einer unsicheren Bedeutung? Dann würde dasselbe von den Worten „Zusammensetzen“ und „Zerlegen“ gelten. Es scheint, unsere Kategorien sind gar nicht so beschaffen, daß sie die wesentlichen Formen vorgelegter Denkgegenstände eindeutig wiedergeben, und umgekehrt das Individuelle bestimmter Objekte wie selbstverständlich und zwanglos die vorhandenen kategorialen Formen erfüllte, wenigstens nicht in diesem Fall eines physischen Denkmaterials.

Von der Phänomenologie des menschlichen Bewußtseins aus wurden freilich, und bereits vor Entwickelung der eigentlichen Gestalttheorie, begriffliche Scheidungen eingeführt, welche dem Worte „Teil“ absichtlich mehrere Unterbedeutungen gaben. An Empfindungsinhalten unterscheidet man da „unselbständige Teile“, welche auch Seiten oder Momente der Empfindungen heißen, nämlich z. B. Helligkeit und Ausdehnung einer Farbe. Man nimmt an, daß diese Momente nicht summativ, sondern in einer ganz spezifischen Weise vereinigt seien, zugleich (so ist es wenigstens herrschende Meinung) derart, daß nie eines dieser Momente für sich allein vorkomme. Wenn aber das zutrifft, so sind die beiden Lösungen sicherlich keine unselbständigen Teile in dem angegebenen Sinne; denn irgendwie allein können sie ja sehr wohl vorkommen. Man hat zweitens gesagt, ein Zusammentreten von an sich selbständigen Teilen führe bisweilen zu einer Neuschöpfung höherer Gebilde gewissermaßen über jenen, und wieder komme eine besondere Art der Einheit zustande gerade insofern, als dabei eben die Teile das Neue „fundieren“. Das scheint dem vorliegenden physikalischen Fall schon besser zu entsprechen; aber da erfahren wir noch, daß die Teile, welche etwas über sich fundieren, außer der Einheit, die hiermit begründet sein soll, keinerlei Veränderung bei dem merkwürdigen Vorgang durchmachen, sondern so bleiben, wie sie vorher waren. Das paßt nun gar nicht zu dem physikalischen Beispiel; denn wenn es zutrifft, daß etwas Neues in Form spezifischer elektrischer Phänomene an der physischen Vereinigung der Teile auftritt, so ist doch dieses Neue erstens die Folge von (freilich materiell sehr geringfügigen) Vorgängen zwischen den Teilen, die also schon deshalb nicht ganz indifferent dabei bleiben, und zweitens ist es der Neubildung am Gesamtsystem gerade wesentlich und bei ihrer Natur nicht anders von ihr denkbar, als daß sie die Potentiale der Teile gesetzmäßig mitbestimmt und also kräftig beeinflußt. Danach dürfen wir auch nicht sagen, daß die beiden Lösungen „fundierende Teile“ für das elektrische Phänomen darstellen. Bei dem Fundieren wird Teilen eine absolute Starre beigemessen, die in unserem Falle ganz fehlt.

Noch eine dritte Art von Zwischenform zwischen Einheit und Mehrheit hat Stumpf in dem Begriff der „Verschmelzung“ von phänomenalen Inhalten festgelegt. Diese Kategorie, die in der Psychologie von ausgedehnter Anwendung ist, kommt aber für das vorliegende physische Beispiel auch nicht in Betracht. Das bedarf wohl keines besonderen Nachweises; übrigens sollen verschmelzende Inhalte ihre Eigenschaften ebenfalls nicht ändern.

Das sind die verfügbaren Kategorien und Unterkategorien, welche gewissermaßen als anerkannt zu gelten haben. Da man nicht mit gutem logischen Gewissen behaupten kann, daß das konkrete physische Beispiel sich ihnen wie natürlich unterordne, während doch zugleich irgend etwas wie von „Teilen“, von „Zusammensetzung“ oder dergleichen an dem untersuchten System ist, so wäre eine Aufgabe, die logische Bestimmung solcher Ausdrücke zu noch größerer Schärfe fortzuführen, um schließlich zu sehen, in welcher Weise sie vielleicht auch hier eindeutig angewendet werden könnten. Im eben gegebenen Zusammenhang aber würde eine befriedigende Lösung dieser Aufgabe allzuviel Mühe machen, und vorläufig lassen sich leichtere Fragen beantworten.

23. Bei osmotischer Verbindung der beiden Lösungen bestimmte die Materialnatur (Ionenarten, Konzentrationen) beider zusammengenommen eine neue Systemeigenschaft des Ganzen unter gesetzmäßiger Verschiebung der Eigenschaften der Teile. Die Gestalttheorie verlangt ohne viel einschränkende Bedingungen zunächst nur, daß Gebilde des von ihr gemeinten Typus mehr Eigenschaften haben, als aus artgleichen Eigenschaften sogenannter Teile als Resultante hervorgehen würde. Sie läßt die nähere Bestimmung des Begriffes „Teil“ in diesem Fall offen und deutet das durch das Beiwort an; aber im vorliegenden Beispiel würde sie ohne Zweifel die beiden Lösungen als die „sogenannten Teile“ bezeichnen. Hiernach hat das kommunizierende System der Lösungen Gestaltmerkmale. Nach der Gestalttheorie sollen die gemeinten Gebilde unbeschadet ihrer Zerstörbarkeit an und für sich (im prägnanten Sinne eben des Zerstörens) eine spezifische Einheit darstellen. Auch die ist vorhanden; denn sobald die Lösungen kommunizieren, bestimmen sich die elektrischen Eigenschaften (Potentiale) in den Teilen von der Materialnatur des gesamten Komplexes aus, welcher also nach Ausbildung der elektromotorischen Kraft im spezifischen Sinne, nicht in willkürlich-gedanklicher Zusammenfassung ein Ganzes, eine Einheit darstellt. Man sieht hier allmählich, daß es in der Physik keineswegs schlechthin von der Betrachtungsart abhängt, was als ein Ganzes zu gelten hat, was nicht; reale sachliche Eigenschaften entscheiden über diese Frage. Wenn aber die angeführten Charakteristika von Gestalten sich am untersuchten physischen System finden, dann muß dieses ohnehin

kurzweg gesagt „mehr sein als die Summe seiner Teile", und diese Anforderung wird nach dem Gesagten offenbar erfüllt.

Es klingt trivial gegenüber dem einfachen und aus der Nähe so genau übersehbaren physikalischen Beispiel und zugleich fast wunderlich gegenüber den verbreiteten Anschauungen, von denen wir ausgingen, aber es gibt wirklich anorganische physische Gebilde mit denjenigen Merkmalen, welche als auszeichnend für Gestalten angesehen werden.

Die Ableitung elektromotorischer Kräfte zwischen Lösungen geschieht in der Nernstschen Theorie mit Begriffen der physikalischen Chemie; die chemische Art der Ionen wird ja durch die von ihr abhängigen Beweglichkeiten entscheidend für den Potentialsprung. Wenn also oben in den einführenden Bemerkungen gesagt wurde, der Begriff der chemischen Verbindung mit seiner gewiß vorhandenen Analogie zu Gestalten könne uns, als noch nicht hinreichend geklärt, eine Festigung des Gestaltbegriffes nicht leisten, so scheint der Einwand möglich, in dem eben behandelten physischen Beispiel gehe wieder das Gestaltmäßige auf die relativ unklare Konzeption chemischer Verbindungen irgendwie zurück. Das ist jedoch ein Irrtum. Die physikalische Chemie enthält überaus mannigfaltige Gebiete, deren Gesetze in keiner Hinsicht von Hypothesen über die Natur chemischer Verbindungen oder überhaupt chemischer Qualitätsunterschiede abhängen, sondern ganz aus Beobachtungen und allgemeinen thermodynamischen (oder sonst physikalischen) Prinzipien abzuleiten sind. Zu diesen Gebieten gehört der oben von Nernst entlehnte Teil der Elektrochemie; in ihm kommt der Begriff der chemischen Verbindung in keiner für die elektromotorische Kraft maßgebenden Weise vor, und wenn wir von stationären Reaktionen in der Anwendung auf somatische Felder sprachen, so blieb doch ganz offen, welche Natur die dabei entstehenden oder zerfallenden Verbindungen haben. Daß Wasserstoffionen bei gleicher treibender Kraft schneller wandern als Chlorionen u. dgl., ist als experimentelles Datum anzusehen, welches nichts mit unseren Vermutungen über die innere Natur des Wasserstoffions, des Chlorions und noch viel weniger der Verbindung Salzsäure zu tun hat. An einer späteren Stelle dieser Schrift haben wir etwas näher auf die Nernstsche Ableitung der elektromotorischen Kräfte einzugehen, und da wird sich zeigen, daß der Gedankengang im einzelnen gänzlich physikalischen Charakters ist. Auch die Überlegungen, welche uns eben Gestaltmerkmale an dem untersuchten Fall erkennen ließen, enthalten deshalb nichts, was durch die Zukunft speziell chemischer Theorie irgend beeinflußt werden könnte.

24. In seiner ersten Schrift über Gestalten hat von Ehrenfels in dem Bestreben, bestimmte Merkmale der neuen Kategorie anzugeben, zwei Kriterien aufgestellt, denen phänomenale Gestalten genügen sollen. Das erste von ihnen besagt: Wenn wir die Reize (Töne, Lichter usw. im physikalischen Sinne), welche, insgesamt auf einen Menschen wirkend, z. B. eine Melodie, eine phänomenale Raumgestalt usw. hervorbringen, anstatt auf das eine Individuum einzeln auf ebenso viele Individuen einwirken lassen, wie ihre (der Reize) Anzahl beträgt, so ist die Summe der Erlebnisse dieser vielen Menschen ärmer als das Erlebnis des einen. Das, was die Reizvielheit für ein Bewußtsein mehr hervorbringt, als in der

Summe von Einzelindividuen durch die einzelnen Reizwirkungen zusammen entsteht, sind die spezifisch gestaltmäßigen Erlebniseigenschaften. Ich bin nicht überzeugt, daß dieses Kriterium, für einen ersten drastischen Hinweis geeignet, als sachlich maßgebend beibehalten werden kann. Fast scheint es, als kämen danach in einem Menschen zu einer Summe übrigens doch genau von den einzelnen Reizen festgelegter „Empfindungen" nur noch irgendwelche Neuerscheinungen (Gestaltqualitäten) einfach hinzu, und das wäre dann eine Auffassung, durch welche der radikale Sinn und, wie ich glaube, der wesentliche Wert der neuen Kategorie stark beeinträchtigt würde. Das Kriterium verlangt etwas zu wenig von seinen Objekten. Auf der anderen Seite ist es richtig, daß jeder Fall einer Gestaltwahrnehmung auch diese Bedingung erfüllt; die phänomenalen Gestalten entstehen, wenn die sogenannten Teile in einem Menschen zusammenwirken (wobei gleich noch hinzugefügt werden kann: unter einschränkenden Voraussetzungen über die Zeit dieses Zusammenwirkens). Die sogenannten Teile — es bleibe eben dahingestellt, ob damit einzelne „Empfindungen" oder einzelne Reize gemeint sind — müssen offenbar in einer bestimmten Weise „einander funktionell nahekommen", damit die entsprechende Gestaltwirkung sich ergibt; und diese Annäherung, welcher Art sie auch sein mag, ist nur in einem phänomenalen (oder physiologischen) System möglich.

Man braucht kaum zu konstatieren, daß diese notwendige, aber nicht hinreichend charakterisierende Bedingung mutatis mutandis auch von dem physikalischen Beispiel erfüllt wird. Denn sie fordert sicher nichts, was nicht schon oben an diesem festgestellt wurde. Man kann an einem rein physikalischen Beispiel mit Gestaltmerkmalen keine phänomenalen (Bewußtseins-) Eigenschaften zu finden erwarten. Aber hiervon abgesehen, ist es offenbar gerade das Verlangte, wenn die elektromotorische Kraft nur auftritt, nachdem die Lösungen (Teile), in einem physikalischen System vereinigt, einander funktionell genügend nahe gekommen sind. An zwei getrennten Lösungen geben dieselben Materialeigenschaften, die im osmotisch kommunizierenden System die elektromotorische Kraft erzeugen, wie sich von selbst versteht, nichts dergleichen.

Handelt es sich um die elektromotorische Kraft zwischen zwei verschiedenen Erregungen in somatischen Feldern, so ist die Übereinstimmung noch deutlicher. Die beiden Erregungen, auf verschiedene Nervensysteme verteilt, geben keine elektromotorische Kraft, da sie nicht einem physikalischen System angehören. Kommen sie dagegen in einem somatischen Felde einander genügend nahe (ist osmotische Verbindung vorhanden), so entsteht die elektromotorische Kraft und was weiter aus ihr hervorgeht. Das alles ist banal, wenn man angefangen hat, es zu beachten; da wir aber nicht darauf zu achten pflegen, muß es wohl trotz aller Banalität gesagt werden.

Übrigens läßt das physische Beispiel keinen Zweifel darüber, daß in ihm von den vorgeschriebenen Materialbedingungen im ganzen der elektrische Systemzustand durchweg, für das System und damit (bis auf eine additive Konstante) gesetzmäßig in den Teilen bestimmt wird (vgl. oben 21 f.), daß also in diesem physikalischen Falle eine elektrische Gestalt in radikalerem Sinne vorliegt, als das erste Ehrenfels-Kriterium wohl fordert. Doch das wird später viel klarer hervortreten.

25. Nach dem zweiten Ehrenfels-Kriterium ist es für phänomenale Gestalten charakteristisch, daß sie in ihren spezifischen Eigenschaften erhalten bleiben, wenn die absoluten Gegebenheiten, auf denen sie beruhen, Verschiebungen bestimmter Art erfahren. So wird eine Melodie sich nicht wesentlich ändern, deren sämtliche Töne gleicher relativer Verschiebung unterworfen werden, eine optische Raumgestalt angenähert sich gleich bleiben, wenn sie an anderem Orte und in ganz anderem Maßstab, aber in gleichen Proportionen vorliegt. Gestalten sind also nach von Ehrenfels „transponierbar". Dieses Kriterium verlangt vielleicht etwas zuviel; es könnte Fälle geben, wo die absoluten Gegebenheiten ihrer Natur nach nicht in der vorausgesetzten Art verschoben werden können, während doch eine Gestalt vorliegt, auf welche sich nun das Kriterium nicht recht anwenden läßt. Wo dagegen die Transposition stattfinden kann, da erweist sie freilich besonders deutlich, wie die Gestalt, deren Charakter durch die Verschiebung nicht wesentlich betroffen wird, von den absoluten Gegebenheiten unabhängig ist und deshalb offenbar nicht additiv aus ihnen hervorgeht. Transponierbarkeit ist hinreichende, aber nicht notwendige Bedingung dafür, daß ein Phänomen Gestaltcharakter hat.

Die elektromotorische Kraft an der Grenze zweier verschiedener Elektrolyte (der Potentialsprung zwischen den beiden Lösungen) genügt auch dem zweiten Ehrenfels-Kriterium. Als absolute Gegebenheiten, die innerhalb weiter Grenzen verschoben werden können, betrachten wir die Konzentrationen der beiderseits vorhandenen Ionenarten, und wenden uns zunächst dem Falle zu, wo die Ionenarten in beiden Lösungen dieselben sind, also nur Konzentrationsunterschiede vorkommen. Dann läßt sich erweisen, daß die elektromotorische Kraft nicht von den absoluten Konzentrationen beiderseits abhängen kann, daß sich vielmehr deren Beträge bei konstantem Potentialsprung beliebig verschieben lassen. Zunächst ergibt sich aus den früheren Ausführungen ohne weiteres, daß die elektromotorische Kraft immer Null ist, wenn die Konzentrationen zu beiden Seiten gleiche, aber übrigens beliebige Werte haben; denn dann haben wir es ja jedesmal im Grunde mit einer durchweg gleichartigen Lösung zu tun. Dieser Fall, daß die elektro-

motorische Kraft ganz ausbleibt, ist also jedenfalls transponierbar. Nun ist der Potentialsprung zwischen den Lösungen eine stetige Funktion der Konzentrationen beiderseits, d. h. wenn die Konzentrationen in beiden Lösungen immer weniger voneinander abweichen, dann wird hierdurch auch die elektromotorische Kraft allmählich (ohne Sprünge) auf beliebig kleine Beträge und schließlich auf Null gebracht. Wenn wir also von einem Falle ausgehen, wo beiderseits die Konzentration c_1 der Ionen vorliegt (elektromotorische Kraft $= 0$), so können wir einen Potentialsprung von bestimmter Richtung und Größe dadurch erzeugen, daß wir in einer der Lösungen die Konzentration auf $c_1 + \Delta c_1$ bringen, während in der anderen Lösung c_1 erhalten bleibt. Beginnen wir mit einem ganz anderen Betrag c_2, der zunächst wieder die Konzentration beiderseits angibt (elektromotorische Kraft $= 0$), so haben wir aus dem angegebenen Grunde (Stetigkeit) die Konzentration in einer Lösung nur allmählich zu ändern, um bei einem gewissen Δc_2 (oder $c_2 + \Delta c_2$) den Potentialsprung nach Richtung und Betrag genau wiederzuerhalten, den wir vorher von c_1 ausgehend hergestellt hatten. Das Zeichen Δ soll dabei nicht geringe Unterschiede der Konzentration zwischen den beiden einander berührenden Lösungen vorschreiben, es kann sich um große Unterschiede und also beträchtliche Potentialsprünge handeln, die auf die angegebene Weise beliebig zu transponieren sind [1]).

Der Fall, daß zwei Lösungen ungleicher Ionenarten vorliegen, führt auf dieselbe Überlegung, nur mit der für diesen Zusammenhang unwesentlichen Modifikation, daß gleiche Konzentration beiderseits hier im allgemeinen nicht die elektromotorische Kraft Null bedingt, sondern einen von den Beweglichkeiten abhängigen endlichen Wert; von diesem ausgehend, kann man aber durch geeignete Variation der Konzentrationen genau ebenso transponieren wie im ersten Beispiel.

Eine solche Betrachtung ist nicht streng; aber in Wirklichkeit wird das Kriterium der Transponierbarkeit von den elektromotorischen Kräften zwischen Lösungen in viel besserem Sinne erfüllt, als man in so primitiver Weise zeigen kann. Die mathematische Theorie von Nernst, die wir später auf Potentialsprünge in somatischen Feldern anzuwenden haben, geht viel bestimmter und klarer vor. Sie bestätigt nicht allein, daß wirklich bei ganz verschiedenen absoluten Konzentrationen die elektromotorische Kraft zwischen zwei Lösungen die gleiche sein kann, sondern zeigt darüber hinaus, daß dies stets bei gleichen Verhältnissen der Konzentrationen zu beiden Seiten der Fall ist. Transposition ist in dem physikalischen Falle unter genau denselben Bedingungen

[1]) Schon oben wurde erwähnt, daß die elektromotorische Kraft mit dem Unterschied der Konzentrationen ohne Oszillieren anwächst. Das ist bei dieser Überlegung vorausgesetzt.

streng gegeben wie für Gestalten in der Psychologie: bei Erhaltung der Proportionen zwischen den absoluten Gegebenheiten.

So hat z. B. der Potentialsprung zwischen zwei Lösungen, deren eine 0,1 Mol HCl im Liter enthält, während in der anderen die HCl-Konzentration 0,01 ist, den Betrag von 0,038 Volt. Würden die Konzentrationen beiderseits im gleichen Verhältnis verändert, z. B. auf die Hälfte herabgesetzt, so bliebe bei den ganz anderen absoluten Konzentrationen die elektromotorische Kraft doch nach Richtung und Betrag dieselbe. Für Lösungen von 0,1 KCl und 0,1 HCl ist der Potentialsprung 0,027 Volt, aber er muß nach der Theorie bei gleichem Konzentrationsverhältnis derselbe sein, selbst wenn die absoluten Konzentrationen beiderseits auf ein Zehntel ihrer vorherigen Werte herabsinken. Der Ausfall der experimentellen Prüfungen entspricht durchaus diesen Anforderungen der Theorie (vgl. Nernst, a. a. O., S. 780).

Damit haben wir auf alle diejenigen Gesichtspunkte Rücksicht genommen, welche bei ganz allgemeiner Betrachtung phänomenaler Gestalten für maßgebend zu gelten scheinen. Nach diesen Gesichtspunkten sind elektromotorische Kräfte zwischen zwei verschiedenen Elektrolyten eine physikalische Erscheinung von Gestalteigenschaften. Da die naturphilosophische Untersuchung zunächst gar nicht mehr leisten soll, als daß ein Fall dieser Art gemäß den vorhandenen Angaben der Psychologie gefunden werde, so ist in dieser Hinsicht das Ergebnis entscheidend.

26. Nun wurde aber keinerlei Voraussetzung gemacht, welche die Betrachtung gerade auf unorganisierte Elektrolyte einschränkte; also gilt das Resultat auch dieser Überlegungen genau ebenso für die elektromotorischen Kräfte in nicht homogen erregten nervösen Feldern, und es folgt, daß sich selbst in den einfachsten Fällen inhomogener Erregung an den ungleichartig erregten Feldgebieten Erscheinungen von Gestaltcharakter ausbilden [1]). In allen oben (18) angeführten Beispielen aus taktilem, akustisch-vestibulärem und optischem Gebiet treten physische Gestaltfaktoren auf, und da wir deren physikalische Natur gut kennen, so darf das Operieren mit ihnen (z. B. in der Psychologie) nicht als eine unsichere Neuerung abgelehnt werden, sondern wer z. B. über Konturen, optische Gestalten in Ruhe und in Bewegung, über die Motorik des Auges, über Tiefensehen und über die Konstitution

[1]) Dasselbe gilt von jedem Falle lokal beschränkter Reizung in übrigens unerregtem Felde. In der Tat ist also das Auftreten von elementaren Gestaltwirkungen „eine natürliche Folge jeder (hinreichenden) Reizung lebender Substanz“. Vgl. die vierte Schrift der Anthropoidenstation auf Teneriffa, Berliner Akademieberichte 1918, Phys.-math. Kl. Nr. 2, S. 37 f.

von Sehdingen theoretische Untersuchungen anstellt, der wird leicht Fehler machen, wenn er über den absoluten Erregungen das Auftreten physischer Faktoren von Gestalteigenschaften außer acht läßt. —

Man könnte versuchen, das Gefundene sogleich physiologisch weiter zu verwenden; doch soll das hier aus zwei Gründen nicht geschehen.

Erstens ist zwar eine physische Erscheinung mit Gestaltmerkmalen überhaupt aufgewiesen, und der zu Anfang geplante Weg scheint gangbar, aber die elektromotorischen Kräfte genügen durchaus nicht allen Ansprüchen, die bei Durchführung einer Theorie z. B. für optische Felder erhoben werden müßten. Wenn den wesentlichen Eigenschaften phänomenaler Raumgestalten analoge Seiten physischer Gestalten entsprechen sollen, dann ist hierfür in Potentialsprüngen allein noch nicht das Prinzip gefunden. Denn für optisch wahrgenommene Gestalten haben Formen und Größen der Reizkomplexe eine entscheidende Bedeutung, und gerade diese beiden Faktoren sind für die elektromotorischen Kräfte ganz gleichgültig. Also kann das Verlangte von den bisher gewonnenen Daten aus unmöglich geleistet werden. Es kommt hinzu, daß man bei einem naiven Versuch, durch Kombination mehrerer Potentialsprünge etwa Gestalten höheren Ranges zu schaffen, gänzlich in die Irre ginge. Nicht ohne jeden Grund ist es gewöhnliche Meinung, alle Physik sei additiven Charakters: die Kombination mehrerer elektromotorischer Kräfte gibt einfach deren algebraische Summe, d. h. mehrere Gestalten dieser Art, in einem System vereinigt, beeinflussen einander gar nicht.

Zweitens wurde bisher mehr ein Ausblick auf die Natur physischer Gestalten als eine wirklich klare Erkenntnis ihrer wesentlichen Eigenschaften gewonnen. Bei dem Nachweis von Gestaltmerkmalen der Potentialsprünge haben wir uns noch mit recht unbestimmten Begriffen behelfen müssen, und es ist unwahrscheinlich, daß sich überhaupt an einem ersten Beispiel Zufälliges des Einzelfalles und Typisches der Kategorie sofort scharf trennen lassen. Wenn es sich also vor allem auch darum handelt, mit Hilfe der hochentwickelten Physik den Gestaltbegriff fester zu bestimmen und so seine Anwendung zu einer vollkommen sicheren Denkoperation zu machen, dann sind wir noch bei weitem nicht am Ziel. Es wird notwendig, andere Fälle von Gestalten in der Physik zu suchen, damit an einer etwas größeren Mannigfaltigkeit das überall Wiederkehrende als typisch von selbst hervortrete, und wir durch Denkübung befähigt werden, es schließlich klar zu formulieren. Sachlich und logisch wird damit auch für spätere Bemühungen auf physiologischem und, wie ich glaube, selbst phänomenalem Gebiet notwendige Vorarbeit geleistet.

Abschnitt II.

Die elektrostatischen Strukturen.

Erstes Kapitel.

„Undverbindungen“ und „Physikalische Systeme“.

27. Wenn so allgemein bekannte Phänomene wie die elektromotorischen Kräfte in heterogenen Systemen Gestalteigenschaften dieser Systeme sein konnten, ohne gerade hierdurch besonders aufzufallen, so ist es nur wahrscheinlich, daß noch andere physikalische Erscheinungen der gesuchten Art allgemein bekannt und doch in gleicher Weise verborgen sind, d. h. noch nicht vom Standpunkt der Gestalttheorie gesehen wurden.

Von vornherein wird eine Beschränkung des Problems eingeführt. In der Geschichte des menschlichen Denkens und ganz besonders der Naturphilosophie und Physik hat sich deutlich herausgestellt, daß die Behandlung von dynamischen Problemen gedankliche Schwierigkeiten mit sich bringt, wie sie ähnlich dem theoretischen Erfassen von statischen und stationären Zuständen nicht im Wege sind. Noch in der Gegenwart macht die Physik eine Krisis durch, welche gerade in überraschenden Umformungen des physischen Zeitbegriffes und in Kämpfen um die merkwürdigen Folgen der Neuerung besteht. So empfiehlt es sich, vorläufig alle die Erscheinungen von der Betrachtung auszuschließen, bei denen dem Faktor „Zeit“ eine wesentliche Bedeutung zukommt, und die Aufmerksamkeit, wie im vorigen Abschnitt, zunächst statischen und stationären Zuständen zuzuwenden. Läßt sich die Aufgabe für diese lösen, so wird überdies das allgemeinere Problem hinterdrein doch leichter zu behandeln sein. — Wenn schon also die Erwähnung und Verwendung dynamischen Geschehens in den folgenden Überlegungen nicht ganz zu vermeiden ist, so soll das doch stets in der Weise geschehen, daß nur die unfragliche physikalische Tatsache bestimmter dynamischer Vorgänge vorausgesetzt wird, dagegen nichts über ihre gestaltete oder ungestaltete Natur.

28. Wir wiederholen noch einmal die Fragestellung: Gibt es physikalische Gesamtzustände oder Gesamtgebilde, die nicht als die Summe, nicht als bloße „Undverbindungen“ (Wertheimer, Koffka) elementarerer Einzelzustände und Einzelgebilde gelten können? Wollen wir diese Frage beantworten, so müssen wir allmählich genauer fixieren, was wir mit den Worten „Summe“ und „Undverbindung“ meinen. Auf Schärfe in dieser Hinsicht kommt es am Ende an; denn gibt es einen strengen Wortsinn des Terminus „Summe“, und bleibt doch zugleich ein laxerer Sprachgebrauch erlaubt, nach welchem die verschiedensten Arten eines „Zusammenseins“ noch „Summe“ genannt werden dürften, so wird immer die Gefahr bestehen, daß diese letzteren, weniger klar erfaßten Fälle eines „Zusammen“ als rein summative Gebilde erkenntnistheoretisch behandelt werden, weil sie eben auch „Summen“ heißen, oder noch schlimmer: sie könnten, wie das in der Psychologie nur zu viel geschehen ist, je nach Bedarf einmal als „Summen“ gelten, und dann doch wieder als „nicht eigentliche Summen“, weil der Ausdruck ja nicht so extrem gemeint gewesen sei. Da also unsichere und unproduktive Diskussionen das notwendige Resultat der Untersuchung wären, wollte man solche Unbestimmtheiten zulassen, so definieren wir eine reine Summe in dem Sinne, in welchem jedermann dieses Wort meint, wenn er Anlaß hat, seine Bedeutung streng festzulegen: Ein „Zusammen“ ist dann und nur dann eine reine „Summe“ von „Teilen“ oder „Stücken“, wenn es aus ihnen, und zwar einem nach dem anderen[1]) hergestellt werden kann, ohne daß infolge der Zusammensetzung einer der „Teile“ sich ändert. Umgekehrt: Ein „Zusammen“ ist dann eine reine „Summe“, wenn durch Ausscheidung von „Teilen“ oder „Stücken“ weder das zurückbleibende „Restzusammen“ (das dann eine Teilsumme darstellt), noch die ausgeschiedenen „Teile“ geändert werden. Daß die Definition „Summe“ und „Teil“ zugleich betrifft, ist nicht zu vermeiden, da diese Begriffe nur zwei Seiten eines und desselben Denkgebildes bezeichnen, auch tut dieser Umstand der Anwendbarkeit der Begriffe keinen Abbruch. — Wie man sieht, fällt der mathematische Summenbegriff unter die angegebenen Bestimmungen. Das leuchtet ohne weiteres ein für die Summen, die auch der Nichtmathematiker kennt, und deren Teile oder Posten diskrete endliche Beträge sind; es gilt aber ebenso für die Summenbildung an stetigen und kontinuierlichen Gebilden, wie sie mit den

[1]) Man könnte versucht sein, auch noch zu fordern „in willkürlicher Reihenfolge“. Aber das Beispiel der unendlichen Reihen in der Mathematik, bei denen eine bestimmte Gliederfolge vorgeschrieben wird, zwingt hier zur Vorsicht. Vgl. z. B. Nernst und Schoenflies, Mathematische Behandlung der Naturwissenschaften (7. Aufl. 1913), S. 231.

Methoden der Integralrechnung ausgeführt wird. Ist z. B. $f(x)$ eine Funktion, die zwischen den Werten a und b der unabhängigen Variablen endlich und stetig bleibt, so muß das bestimmte Integral $\int_a^b f(x)dx$ als der Grenzwert einer Summe von Rechtecken $\Sigma f(x)\Delta x$ (für verschwindendes Δx und für ein entsprechendes Anwachsen der Summandenzahl) notwendig denselben Bedingungen genügen; und in der Tat kann man ja die eben angegebenen Kontrolloperationen an einem derartigen Integral vornehmen[1]).

Diese erste Bestimmung genügt jedoch noch nicht für die Zwecke der folgenden Untersuchung. Je nach der jeweiligen Denkaufgabe kann an einem „Zusammen“ seine Gruppierung ohne jede Bedeutung oder aber auch von wesentlichem Interesse sein. Im letzteren Falle darf wieder von einer „summativen Gruppierung“ gesprochen werden, wo die betreffende Verteilung des „Zusammen“ durch Postierung einzelner Stücke nacheinander, je an die vorgeschriebenen Plätze, gebildet werden kann, ohne daß dabei einer der Teile seine Eigenschaften ändert. Und abermals auch umgekehrt: Ein „Zusammen“ besitzt eine summative Gruppierung, wenn durch Ausscheiden von Teilen oder Stücken weder an der Verteilung des zurückbleibenden Restes (der dann eine Teilgruppierung darstellt), noch an den ausgeschiedenen Teilen etwas geändert wird. Auch dieser Begriff entspricht ungezählten Gruppierungen im alltäglichen Leben ebensowohl wie Verteilungen rein geometrischer Natur, die der Mathematiker untersucht. — Sechs Münzen, die auf dem Tische so liegen, daß sie die Ecken eines regelmäßigen Sechseckes vorstellen könnten, ändern ihre Natur durch diese Anordnung nicht irgend merklich; wenn die Hälfte von ihnen entfernt wird, bleiben die übrigen drei in genau derselben Gruppierung, die sie im Zusammen der sechs vorher einnahmen. Ebenso steht es der Willkür des Geometers vollkommen frei, eine Halbschleife usw. der Lemniskate zu untersuchen, und die geometrischen Eigenschaften solcher Teilfiguren sind genau dieselben, ob sie als diese Stücke, d. h. abgetrennt, oder in der Gesamtfigur behandelt werden[2]).

Aus beiden Bestimmungen zusammen ergibt sich die Konsequenz, um derentwillen den reinen Summen und rein summativen Gruppierungen eine so allgemeine gedankliche Anwendbarkeit zukommt: Wenn Denkobjekte die Behandlung als Summen und als summative Gruppierungen überhaupt zulassen, dann ist es offenbar (vgl. das letzte Beispiel) ganz dem Bedarf im

[1]) Endlichkeit und Stetigkeit von $f(x)$ sind nicht einmal stets erforderliche Vorbedingungen.

[2]) Von dem phänomenalen optischen Eindruck gilt das freilich durchaus nicht ohne weiteres.

Einzelfall anheimgestellt, welche Teile als Summen zusammengefaßt, und welche Verteilungen als ihre Gruppierung gewählt werden. Denn die Posten oder Stücke reagieren ja nicht auf Summen- und auf Gruppenbildung dieser Art, Summen- und Gruppenreste bleiben auf alle Fälle dasselbe, was sie im (willkürlich gewählten) vollständigen Zusammen waren. Eine Fülle von Beweisen der Mathematik sowohl wie der Physik macht von dieser Eigenschaft der Summen und additiven Gruppen besten Gebrauch.

29. Man könnte meinen, eine Definition des Summativen, die von ihren Objekten so viel verlangt, sei am Ende in dieser scharfen Form aufgestellt, damit dann mit leichter Mühe nicht-summative Gebilde in der Physik aufzufinden wären. Aber ein solcher Argwohn ist schon deshalb unberechtigt, weil wirklich der Begriff des Summativen in genau der angegebenen Form eine geradezu beherrschende Rolle in der Physik spielt, so sehr, daß man bei einem Überblick über die Fälle seiner Anwendbarkeit in dieser Wissenschaft zunächst noch einmal auf den Glauben kommen könnte, es sei in ihr doch jedes Gebilde additiver Natur. — Wenn man die Realität und die charakteristischen Eigenschaften übersummativer physikalischer Gebilde vollkommen verstehen will, wie sie nachher zu untersuchen sind, so muß man sich vorher noch einmal mit aller Klarheit vergewissert haben, daß für die Physik in solcher Breite die Konzeption des Rein-Summativen bestimmend ist. Je schärfer der Kontrast zur Geltung kommen kann, desto besser wissen wir nachher, daß kein bloßes Spiel der Terminologie oder eine von vielen philosophierenden Zurechtlegungen der Natur, sondern eine durchaus konkrete Unterscheidung zu vollziehen ist, die sich unmittelbar aus den Eigenschaften physikalischer Denkgegenstände ergibt.

Die wesentlichen Größen, mit denen die Physik zu tun hat, pflegen gegenwärtig eingeteilt zu werden in Skalare und Vektoren, in Größen also, die durch ihren Betrag (etwa an einem Punkt oder in einem System) hinreichend zu kennzeichnen sind, und solche, denen außer einem Betrag noch eine bestimmte Richtung im Raume zukommt[1]). Man findet bei einer ersten Übersicht rein summatives Verhalten beider Größenarten, ganz unzweideutig zeigt es sich zunächst an Beispielen von Skalaren:

Die Masse, die in einem System enthalten ist, kann diesem System in Einzelbeträgen zugeführt oder aus ihm entfernt werden, ohne daß sich die Teilmassen dabei änderten, und das gilt ohne Rücksicht auf alles Geschehen, sogar wenn chemische Reaktionen eintreten, mit aller Strenge, deren die messende Kontrolle über-

[1]) Die Unterklassen der Vektoren, ihre Einteilung in polare und axiale gerichtete Größen und dergleichen mehr bleiben hier der Kürze wegen unberücksichtigt.

haupt gegenwärtig fähig ist [Landolt[1])]. — Die elektrische Ladung eines Systems kann man ihm in Teilladungen zuführen, bis der gewünschte Betrag als die Summe der Einzelbeträge erreicht ist, und wiederum die unterteilte Entladung wird derart erfolgen, daß stets die abgegebenen Elektrizitätsmengen genau der Verminderung im System gleichkommen. Sind die Einzelbeträge teils positive, teils negative Ladungen, so bleibt doch immer der resultierende Betrag die Summe aller Teile im algebraischen Sinne. — Die Energie, die einem Raumgebiet oder einem System im ganzen zuzuschreiben ist, läßt sich in Teilbeträgen entfernen, und stets wird der Restbetrag die Differenz zwischen dem ursprünglichen und dem ausgeschiedenen Quantum sein, außerhalb des Systems wird sich um genau ebensoviel Energie mehr finden, als von innen abgegeben wurde. — Diesen drei Tatsachen entsprechend, kennt die Physik ein Gesetz der Erhaltung der Masse, der Elektrizität und der Energie.

Wiederum ähnlich liegen die Dinge bei Potentialen: Bringt eine irgendwie fixierte Elektrizitätsmenge an einem Raumpunkt in ihrer Nähe das elektrostatische Potential auf einen bestimmten Wert a, und eine zweite Ladung, deren Ort wir uns vorgeschrieben denken, erzeugt an derselben Stelle das Potential b, so ist das resultierende Potential für diesen Punkt $(a + b)$ usw., und wie die Addierung können wir die Subtraktion von Einzelpotentialbeträgen für einen Raumpunkt durchführen, solange die Elektrizitätsmengen fixiert sind: Am Ende ist stets das Potential an jedem Raumpunkt die Summe der Potentiale von sämtlichen fixierten Elektrizitätsmengen für den Punkt. — Dasselbe gilt für die magnetischen Potentiale, die in der Umgebung von Magneten und von stationären elektrischen Strömen bestehen. Wird aus einer Mehrheit von Strömen einer entfernt, während sich an den übrigen nichts ändert, so bleibt auch das magnetische Potential überall die Differenz zwischen den ursprünglichen Werten und denen, welche der eine Strom hervorgebracht hätte; dieser selbst, aus dem System entfernt, ist an seinem neuen Ort von denselben Potentialen für jeden Raumpunkt umgeben, welche er vorher zu dem Felde der Strommehrheit beigesteuert hatte[2]).

Die Erwähnung dieser besonders wichtigen unter den nicht gerichteten Größen wird genügen. Für Vektoren tritt eine gewisse, wenn schon für diesen Zusammenhang unbedeutende Komplizierung ein. Gleichgerichtete Vektoren verhalten sich additiv wie Skalare,

[1]) Nach dem Relativitätsprinzip wird dieser Satz ungültig (Planck), aber erst jenseits der Grenzen, die zurzeit den Messungen gesteckt sind.

[2]) Ich sehe der Kürze wegen hier von der Mehrwertigkeit des magnetischen Potentials um Ströme ab.

und genau einander entgegengerichtete summieren sich wie positive und negative Elektrizitätsmengen. Bringt also eine irgendwie fixierte Elektrizitätsmenge an einem Raumpunkt die (nach Größe und Richtung bestimmte) Feldstärke $\mathfrak{E}_1$ hervor, und eine zweite, geeignet gelegene, deren Lage ebenfalls fixiert ist, erzeugt an jenem Raumpunkt die Feldstärke $\mathfrak{E}_2$ von gleicher oder genau entgegengesetzter Richtung, so ergibt sich an der betreffenden Stelle eine resultierende Feldstärke $\mathfrak{E}_1 + \mathfrak{E}_2$ als die algebraische Summe beider. Übereinstimmende oder entgegengesetzte Richtung der Summanden kommt dabei durch die Vorzeichen zum Ausdruck, und die Summe besitzt das Vorzeichen des überwiegenden, also dessen Richtung. Unter den vorausgesetzten Umständen ist demnach jede Feldstärke unabhängig von der anderen wirksam. Was für zwei solche Vektoren gilt, läßt sich ohne weiteres auf größere Vielheiten übertragen, und dasselbe Ergebnis hat eine Prüfung von magnetischen und Gravitationsvektoren im entsprechenden Fall.

Bilden die Richtungen zweier Vektoren einen von 0° und 180° verschiedenen Winkel, so wird es merklicher, daß an Stelle der algebraischen die geometrische oder Vektoraddition tritt, deren Natur aus dem Parallelogramm der Kräfte (allgemeiner: der Vektoren) jedermann geläufig ist. Da der Satz vom Parallelogramm der Vektoren nichts anderes besagt, als daß jeder Vektor nach Betrag und Richtung unabhängig von den übrigen zur Geltung kommt, daß also auch aus einer Vektorengesamtheit eine oder mehrere der gerichteten Größen entfernt werden können, ohne daß dieser Umstand die Wirksamkeit der übrigen beeinflußt, so handelt es sich bei der Vektoraddition offenbar um eine Änderung der Rechnungsart, die der gerichteten Natur der summierten Teile angepaßt ist, ohne den Charakter eines Summierens dabei zu verlieren. Wir dürfen also auch in diesem Falle sagen, daß Vektoren, deren Träger oder Ausgangspunkte wir uns irgendwie fixiert denken, an einem Raumpunkt rein summativ zusammenwirken[1]). — Das alles ist ja auch dem Nichtphysiker so geläufig, daß erst aus dem weiterhin folgenden klar werden kann, eine wie geringe Modifikation der Formulierung diese Sätze mehrdeutig und sogar falsch machen würde.

Bestimmte Gruppierungen physikalischer Größen im Raum ändern an diesem Bilde nichts, solange die Verteilung als solche dabei vorläufig noch unbeachtet bleibt, und nur festgestellt wird, ob das Summationsprinzip verloren geht, wenn die betrachteten physikalischen Größen sich an Linien entlang, über Flächen oder in Räumen mit natürlicher Freiheit verbreiten. Das kann man für

[1]) Für axiale Vektoren wird der Wortlaut, nicht aber der wesentliche Sinn des Summationsprinzips verändert.

die wichtigsten ungerichteten Größen wie Masse, Elektrizitätsmenge, Energie schon aus dem bisher Gesagten entnehmen. So läßt in einem materiellen System, dessen Dichte an verschiedenen Stellen des eingenommenen Raumes nach irgendeinem Gruppierungsprinzip variiert, ein gewöhnliches Integral die Gesamtmasse bestimmen; nach Entfernung eines Teiles der Systemmasse liefert eine erneute Integration über den Raum des Systems genau die Differenz zwischen dem ursprünglichen Betrag und dem entfernten Teil, eine Raumintegration über den entfernten Teil genau den Minderbetrag der Systemmasse, auch wenn sich inzwischen die Gruppierung hier und dort durch den Eingriff verschoben haben sollte. Die Beträge verteilter Massen im ganzen, ohne Rücksicht auf ihre Gruppierung, verhalten sich also wie reine Summen. Ganz das gleiche gilt von den irgendwie gruppierten Energiebeträgen eines Systems sowie von den elektrischen Ladungen, die ein isolierter Leiter trägt: Man kann sie irgendwie ordnen, umgruppieren oder sich selbst gruppieren lassen; die Mengen gruppierten Materials als solchen und im ganzen bleiben Summen, können im strengen Sinn geteilt werden usw.

30. Von jetzt ab wenden wir uns den Verteilungen und Gruppierungen selbst zu. Unter welchen Bedingungen diese einen rein summativen Charakter besitzen, wurde oben angegeben (28.) Eine ungeheure Mannigfaltigkeit von Verteilungen physischer Objekte sind additiver Natur in jenem Sinn. Drei Steine, von denen der eine in Australien, der zweite in Afrika, der dritte in den Vereinigten Staaten liegt, bilden eine Gruppierung, von der jedes Stück entfernt, verschoben, wieder an seinen ursprünglichen Platz gebracht werden kann, ohne daß die beiden übrigen davon beeinflußt oder in ihrer „Partialverteilung“ zueinander davon betroffen würden. Eine Auswahl von Fixsternen, die wir derart treffen, daß die Entfernung je zweier sehr viele Lichtjahre beträgt, kann wohl als eine additive Gruppe angesehen werden; es ist wenig wahrscheinlich, daß, wenn einer von ihnen an einen anderen Platz versetzt werden könnte, die anderen und ihre Verteilung zueinander eine Änderung erführen. Philosophen haben geäußert, im Grunde stehe jedes Weltelement mit jedem anderen in Zusammenhang, und jedes wirke auf jedes ein. Das ist ein Gedanke, der formal zutreffen mag; aber hier wollen wir uns durchweg an Zusammenhänge und Einwirkungen halten, deren Grad wir uns als eine Beeinflussung der betrachteten Gruppenteile irgendwie feststellbar vorstellen können; denn es ist jedenfalls Tatsache und für das Begreifen der Natur ein Glück, daß die weitaus meisten der auf solche Weise zu konstruierenden Zusammenhänge einen verschwindenden Einfluß auf das Naturgeschehen haben, nicht nur subjektiv

für uns, sondern sehr real, insofern sie neben einer geringeren Mannigfaltigkeit starker und stärkster Zusammenhänge gar nicht als gleichwertig angesehen werden dürfen. Deshalb lassen wir auch eine Wärmestrahlung außer acht, die ein afrikanischer Stein theoretisch allenfalls einem australischen zusenden könnte[1]), und berücksichtigen ebensowenig die Strahlung oder die Gravitationswirkung von einem jener Fixsterne auf die anderen; die räumliche Gruppierung der Teile in beiden Beispielen, die wir zunächst untersuchen, wird von derartigen Faktoren kaum beeinflußt. Und aus diesem Grunde ist es auch gar nicht erforderlich, physische Objekte zu wählen, die in so großen Entfernungen voneinander ihre Plätze einnehmen. Ganz dasselbe gilt im allgemeinen und mit genügender Annäherung von einer Gruppe Steine, die je 1 m voneinander entfernt auf der Straße liegen. Wird einer von ihnen entfernt oder umgelegt, so wird sich in der Regel an den anderen und ihrer „Partialverteilung" nichts Merkliches ändern. Oben wurde bereits als ähnliches Beispiel eine Münzengruppe angeführt, und wenn wir beachten, daß die Wahl gerade dieser beiden Objektarten offenbar ganz zufällig ist, und daraufhin den Blick in unserer Umgebung wandern lassen, so finden wir, daß mit gewissen Ausnahmen die Objekte, welche wir ungezwungen „Dinge" nennen, rein summative Verteilungen miteinander bilden, solange sie einander nicht berühren. Unter „Dingen" verstehen wir dabei die nicht belebten Körper im festen Aggregatzustand, so wie sie uns ohne besondere Untersuchung vorkommen, also den größten Teil der uns gewöhnlich merkbaren unorganischen Umwelt. Selbst im Falle der Berührung zweier oder mehrerer „Dinge" bleibt ihre Verteilung im Raum für eine nicht zu kritische Betrachtung im allgemeinen durchaus additiv, falls die Berührung „schwach" ist, und falls sie quer zur Richtung der Erdschwerkraft erfolgt: unter solchen Umständen führt Entfernung eines „Dinges" aus der Verteilung in der Regel nicht zu einer merklichen Änderung an den übrigen „Dingen" und ihrer Verteilung. So können wir die Einrichtung eines Zimmers Stück für Stück entfernen, ohne daß die Mehrzahl dieser Änderungen das Übrigbleibende und seine Restverteilung wesentlich angriffe; wir würden uns gewaltig wundern, wenn der Tisch auf Entfernung oder Verschiebung des Stuhles seinerseits mit einer Formänderung oder mit einem Ortswechsel reagierte. Dem Naiven ist es eine Trivialität, daß die „Dinge" so gleichgültig gegeneinander bleiben; aber weder der Physiker noch der Philosoph wird es unbeachtet lassen, und für den

[1]) Vielleicht darf man nach der neueren (energetischen) Strahlungstheorie nicht einmal soviel einräumen.

Erkenntnispsychologen ist es, wie ich glaube, eine fundamentale Tatsache. Denn da, wie wir sogleich noch näher zu betrachten haben, in sogenannten „physikalischen Systemen“ gänzlich andere Verhältnisse vorliegen, so bilden Verteilungen von „Dingen“ in der Regel und in der oberflächlichen Erfahrung des Naiven keine „physikalischen Systeme“. Da ferner der Naive naturgemäß von den in seiner Erfahrung überwiegenden Eigenschaften der Umwelt die nachdrücklichsten Wirkungen für sein Denken und insbesondere seine Kategorienbildung erfährt, so ist zu erwarten, daß er auch von diesem normalerweise ganz summativen Verhalten der ihn umgebenden „Dingverteilungen“ irgendein tief eingewurzeltes Vorurteil in sich trägt. Es wird sich später um die Feststellung handeln, welches diese Wirkung sein muß und auf welche objektiven (und subjektiven) Konstitutionseigenschaften der „Dinge“ sie zurückgeht. Für den augenblicklichen Zusammenhang genügt die Tatsache, daß in unzähligen Fällen die Verteilung physischer Objekte rein summativen oder doch sehr angenähert summativen Charakter hat. Unsere Alltagserfahrung müßte sonst eine andere sein.

Der „Naive“, von dem die Rede war, muß vielleicht dem europäisch-amerikanischen Kulturkreis angehören, damit das Gesagte für ihn gilt. Manches spricht dafür, daß das Umweltbild des Primitiven, vielleicht aber auch das des Angehörigen exotischer Kulturen gerade in dieser Hinsicht stark von dem unsrigen abweicht [1]). Der Naive ist also nicht als „unwissend“ zu betrachten, er kann sogar sehr gelehrt sein; nur zuviel Physik darf er nicht verstehen; denn die würde am Ende die Erfahrung an „Dingverteilungen“ durch Erfahrung an „physikalischen Systemen“ korrigieren und ausgleichen. — Bei sehr genauer Prüfung findet die Physik auch an den „Dingen“ und vor allem in ihnen Abweichungen vom summativen Verhalten, aber dergleichen liegt gewöhnlich ganz jenseits der Alltagsbeobachtung.

31. Der Physiker pflegt Verteilungen rein additiver Natur (bloße „Undverbindungen“) nicht zu untersuchen, aus dem einfachen Grunde nicht, daß n Objekte, in eine Verteilung gebracht, gegen die sie sich sämtlich gleichgültig verhalten, jedes für sich in Ruhe oder in Bewegung sind, jedes für sich Naturgesetzen folgen, so daß die Aufgabe, die eine derartige Gruppe stellt, sich von selbst in eine Summe von n selbständigen Untersuchungen auflöst. In der Tat: Wenn und in dem Grade, wie wir einen der Teile aus der Gruppierung entfernen oder in ihr verschieben können, ohne daß die übrige Verteilung davon beeinflußt wird, in demselben Maße gleichgültig muß es die übrigen Teile und ihre Konfiguration lassen, wenn eine rein physikalische Ursache die Änderung einzelner für sich veranlaßt, und damit ist die Auf-

[1]) Ebenso das des Kindes.

lösung in n voneinander unabhängige physikalische Probleme gegeben. Es besteht kein Anlaß, gerade diese n Probleme zusammen zu behandeln [1]).

Wenn die Zahl n äußerst groß wird, gibt es gewisse Fälle, wo selbst bei vollkommener und dauernder Unabhängigkeit aller Teile voneinander das Interesse des theoretischen Physikers rege wird.

Sobald dagegen im Verlauf an sich selbständiger Verschiebungen von Systemteilen Augenblicke kommen, in denen etwa durch zufällige Annäherung eine auch nur vorübergehende Beeinflussung stattfindet, dann sind die Orte und Zustände, also auch die Verteilungen nicht mehr vollkommen selbständig; eine Verschiebung an einer Stelle kann und wird Verschiebungen an anderen bedingen, und wir haben die Grenze erreicht, wo es sich — z. B. in der kinetischen Gastheorie — schon um „physikalische Systeme“ handelt. Man hat nur die Abhängigkeit von Systemteilen weiterzusteigern, so gelangt man alsbald zu Systemen, die im allgemeinen gegen keine Verschiebung oder Zustandsänderung an einem ihrer Punkte mehr gleichgültig bleiben, sondern auf jeden derartigen Eingriff sogleich weithin reagieren. Extremfälle solchen Verhaltens wird man da finden, wo nicht (wie in Gasen) auch auf kürzere Entfernung erst nach merklicher Zeit eine Beeinflussung eintritt, sondern jeder Punkt des Systems in einem kräftigen Feld der übrigen Systempunkte liegt, und eine Verschiebung an einer Stelle praktisch zu gleicher Zeit weithin alles verschiebt. Man versuche, die Ladung eines isolierten Leiters der Elektrizität an einem Punkte zu ändern, zu verschieben, so verschiebt sich auch schon die Ladung im ganzen System. Physikalische Systeme und ihre Verteilungen verhalten sich durchaus anders als die (im allgemeinen) summativen Gruppierungen von „Dingen“; die Gruppierungen in physikalischen Systemen sind nichtadditiver Natur; man hat genau zu unterscheiden zwischen Verteilungen physischer Objekte überhaupt — welche sehr wohl summativ sein können — und den Gruppierungen in physikalischen Systemen.

An dieser Stelle darf man nicht einwenden: Der Begriff des Summativen brauche ja nicht so streng genommen zu werden, auch an den physikalischen Gruppierungen ließe sich wohl irgend etwas in der Richtung des Summativen finden. Man muß im Gegenteil so streng wie möglich sein in seinen Begriffen, und „irgend etwas in Richtung“ darf in dem Augenblick keinen Kurswert und schon gar nicht einen Vorzug haben, wo sich bereits herausgestellt hat, daß den Beträgen nach Summatives im allerstrengsten Sinn für ganz dieselbe Physik beherrschend ist, in der zugleich die Systemgruppierungen nichtsummativen Charakter besitzen.

---

[1]) Vgl. z. B. Mach, Mechanik (französische Ausgabe), S. 437 unten.

32. Da es nicht geläufige Erkenntnis der Naturphilosophie zu sein scheint, daß im unbelebten Naturgeschehen Verteilungen (im physikalischen Sinn) und spontane Umgruppierungen großen Bereichs eine fundamentale Bedeutung haben, so ist zunächst nachzuweisen, daß in der Tat allgemeinste Erfahrungen vom wirklich stattfindenden Naturgeschehen Verteilungen betreffen. Zu diesen gehört allerdings nicht der Satz von der Erhaltung der Energie, aber es ist ja auch (besonders durch Ausführungen Plancks) hinreichend klargestellt, daß dieser berühmte Satz zwar eine universale quantitative Bedingung für jeden Vorgang, aber in der Regel gar nichts darüber aussagt, was denn wirklich unter gegebenen Umständen in der Natur geschieht[1]). Dagegen handelt der zweite Hauptsatz der Thermodynamik gerade von dieser Frage und gibt an, welches in einem gegebenen System die Richtung des wirklich stattfindenden Geschehens ist. Menschliches Denken vermag nur innerhalb bestimmter Grenzen eingeschlossene Probleme auf einmal streng zu behandeln. Wir denken uns deshalb ein System derart gegen die Umgebung abgegrenzt, daß Masse, Volumen und Energie des Gesamtsystems konstant bleiben. Was bedeutet es in anschaulicher Sprache, und wie wird es erreicht, daß in einem solchen physischen Komplex jeder spätere Zustand die größere Entropie besitzt oder auch ein „wahrscheinlicherer Zustand“ ist als die vorhergehenden? Da das System am Ende ein Maximum der Entropie erreicht, so muß der damit gegebene „Gleichgewichtszustand“ durch seinen Unterschied gegen frühere Etappen lehren, auf welche Weise sich die Steigerung der Entropie vollzogen hat. Je nach der besonderen Art des Systems können wir als charakteristische Änderung finden: Eine bestimmte Verteilung der ursprünglich vorhandenen Wärmeenergie, derart, daß die Temperatur überall die gleiche geworden ist; eine Verteilung der ursprünglich vorhandenen Substanz im System, derart, daß der Druck in allen Teilen übereinstimmt; eine Verteilung vorhandener Substanzmengen auf verschiedene Aggregatzustände (von gleichem Druck und gleicher Temperatur); allgemeiner eine Verteilung vorhandener Substanzarten auf eine Anzahl je in sich homogener „Phasen“ (Gibbs); eine bestimmte Verteilung von Geschwindigkeitsrichtungen und Geschwindigkeitsbeträgen im System. In der Regel wird es sich um mannigfache Kombinationen dieser Verteilungsarten handeln, die ich eben absichtlich ohne Rücksicht auf die theoretisch prinzipiellen Gesichtspunkte aufzähle.

33. Wenn der zweite Hauptsatz eine Bedingung für Verteilungen aussagt, so bezieht er sich dabei auf das ganze System

[1]) Vgl. Planck, Thermodynamik (3. Aufl.), § 106 ff.

(von konstantem Energiegehalt). Es ist vielleicht angebracht, daran zu erinnern, daß eine Anwendung des Gesetzes auf Teile eines Systems zu den gröbsten Fehlern führen würde. Ich wähle ein besonders einfaches Beispiel: Zwei Mengen eines und desselben idealen Gases (also praktisch etwa H_2) seien gegen die Umwelt vollständig isoliert und voneinander getrennt durch eine feste, unverschiebbare Wand von guter Wärmeleitfähigkeit und äußerst geringer Wärmekapazität. Die Menge M_1 von der Anfangstemperatur T_1 habe das (konstante) spezifische Volumen v_1, M_2 von der Anfangstemperatur T_2 das (konstante) spezifische Volumen v_2, T_1 sei größer als T_2. Bezeichnet man mit c_v die spezifische Wärme bei konstantem Volumen und für die Masseneinheit, mit R die Gaskonstante und mit m das Molekulargewicht, bedeutet endlich ln den natürlichen Logarithmus, so sind zu Anfang die Entropien S_1 und S_2 der beiden Gasmengen (bis auf eine hier gleichgültige Konstante):

$$S_1 = M_1\left(c_v\, ln\, T_1 + \frac{R}{m}\, ln\, v_1\right),$$

$$S_2 = M_2\left(c_v\, ln\, T_2 + \frac{R}{m}\, ln\, v_2\right)^{1}).$$

Der erste Hauptsatz verlangt, daß die allein mögliche Temperaturänderung, genauer: Verteilung der Wärmeenergie, die innere Energie des Gesamtsystems nicht quantitativ beeinflußt; der zweite Hauptsatz besagt, daß die wirklich stattfindende Verschiebung der Energie im Innern die Gesamtentropie zu einem Maximum macht. Man weiß von vornherein oder kann sofort aus diesen Daten berechnen, daß die beiden Gasmengen eine gemeinsame Temperatur annehmen, welche nach der Mischungsregel

$$T = \frac{M_1 T_1 + M_2 T_2}{M_1 + M_2}$$

zu bestimmen ist. Diese Temperatur liegt unter T_1; also ist in dem einen Teil des Systems nach den obigen Gleichungen die Entropie gesunken, nur in dem anderen Teil und vor allem im Gesamtsystem gestiegen, im letzteren zugleich maximal geworden. Der Naturvorgang verläuft in Teilgebieten so, daß für das Totalsystem der zweite Hauptsatz erfüllt wird; dabei verändert sich eines der Teilgebiete, für sich betrachtet, gerade im entgegengesetzten Sinn. Also wäre es vollkommen verfehlt, die Geltung des Gesetzes im Ganzen von der Geltung an den Teilen additiv ableiten zu wollen. Das Gesetz für das System schreibt vor, was an den Teilen geschehen muß, nicht umgekehrt.

---

[1]) Vgl. Planck, Thermodynamik, § 119.

Von einem so schwer zu übersehenden Erscheinungsgebiet wie dem, auf welches sich der zweite Hauptsatz in erster Linie bezieht, pflegen die einfachsten Fälle die größte Bekanntheit zu erwerben. Da nun die einfachsten und am leichtesten zu verstehenden Erscheinungen in diesem Bereich solche der Wärmeleitung und Diffusion sind, in welchen ein homogener Zustand das Endresultat darstellt, also dem Entropiemaximum entspricht, so zeigen gerade die bekanntesten Beispiele den Verteilungscharakter der Entropievermehrung nicht in auffallender Weise. Irgendein Geschehen, bei welchem das Entropiemaximum durchaus nicht in einem homogenen Zustand des Systems erreicht wird, sondern dieses sich spontan in diskrete „Phasen“ sehr verschiedener Beschaffenheit zerlegt, weist den Betrachter viel eindringlicher auf jene Natur des thermodynamischen Geschehens hin. Denn aus irgendwelchen psychologischen Gründen ist man geneigt, denjenigen Verteilungen geringe Aufmerksamkeit zu schenken, ja das Verteilungsproblem in ihnen ganz zu übersehen, welche an allen Punkten des Systems merklich den gleichen Zustand zeigen. Und doch ist homogene Verteilung in einem physikalischen System nur ein Spezialfall, der insbesondere die nichtadditive Natur der Gruppierung oder des räumlichen Zusammenseins mit anderen physikalischen Verteilungen durchaus gemein hat; auch in jedem System, für welches homogene Verteilung das Entropiemaximum darstellt, bringt Änderung an einem Punkte eine Verschiebung durch das Ganze hervor [1]).

34. Auf allen den Gebieten der Physik, die man nicht zur Thermodynamik zu rechnen pflegt, behält der zweite Hauptsatz insofern universale Bedeutung, als ein anfangs in irgendwelchen Bewegungen und Verschiebungen begriffenes System einen Ruhezustand im Grunde nur erreicht, indem und weil es fortwährend seine Entropie vermehrt [2]). Rein dynamische Gesetze führen zu unendlicher Andauer von Verschiebungen oder zu periodischen Vorgängen (auf Grund der Trägheit und der Selbstinduktion), aber die fortgesetzte Umwandlung von gerichtetem Geschehen in ungeordnetes — und das ist Entropievermehrung — bringt ein jedes System, dem nicht von außen gerichtete Energie nachgeliefert wird, über kurz oder lang zur Ruhe. Freilich ist es nur dieses universale Prinzip, welches der zweite Hauptsatz für dynamisches Geschehen liefert; der bestimmte Zustand von dynamischen Systemen,

[1]) Ich kann hier außer acht lassen, daß die sogenannten homogenen Verteilungen in thermodynamischen Systemen bei Betrachtung im kleinen nicht wirklich homogen sind, sondern nach statistischen Gesetzen um gewisse Werte oszillieren.

[2]) Vgl. Planck, Thermodynamik (3. Aufl.), § 133.

wenn sie am Ende statischen (oder stationären) Charakters geworden sind, hängt von der Natur der Energiearten ab, um die es sich handelt, sowie von Formen (Binduugen), die im Einzelfall die Bewegungsfreiheit einschränken. Überall sind es wieder gewisse Verteilungen, in denen die Systeme zur Ruhe kommen, aber darunter befinden sich Beispiele von ungleich markanteren Verteilungseigenschaften als irgendwo in der Thermodynamik; und den Extremfällen solcher physischen Verteilungen wenden wir uns zu, um ihren Charakter näher zu untersuchen.

Zweites Kapitel.

Die Ladungsstrukturen.

35. Unter den physischen Verteilungen, die sich nicht wie summative Gruppen schlechthin verhalten, wurden oben (31) elektrostatische Ladungen als Beispiel von besonders auffallendem Charakter erwähnt. Da bereits im ersten Abschnitt gerade eine elektrische Erscheinung mit positivem Ergebnis untersucht wurde, liegt es um so näher, auf dem anscheinend günstigen physikalischen Gebiete weiterzuforschen.

Ein Leiter der Elektrizität, der genügend isoliert ist, um für die Zeit der Untersuchung keinen merklichen Ladungsbetrag zu verlieren, sei fern von allen Objekten angebracht, die sein Verhalten beeinflussen könnten. Dazu gehört also auch, daß die Einwirkung eines isolierenden Trägers (Glas-, Hartgummifuß) schwach genug ist, um vernachlässigt zu werden, kurz, daß das umgebende Dielektrikum als homogen gelten kann. Welchen Bedingungen der geladene Leiter im Gleichgewichtszustand genügen muß, lehrt die Elementarphysik: Da unter dem Einfluß auch der geringsten Kräfte im Innern eine Verschiebung (räumliche Trennung ungleichnamiger Elektrizitäten) erfolgen würde, die im Ruhezustand ausgeschlossen sein soll, so muß die Resultante der Feldstärken für jeden inneren Punkt Null sein. Und ebenso, da Elektrizitätsmengen an der Oberfläche den schwächsten Kräften folgen würden, so müssen die tangentiellen Komponenten der Feldstärken für jeden Oberflächenpunkt einander aufheben. Faßt man die erste Bedingung mit dem Gesetz zusammen, daß die Feldstärke elektrischer Ladungen mit dem Quadrat der Entfernung abfällt, so folgt [1]) die fundamentale

[1]) Sind X, Y, Z die Komponenten der resultierenden Feldstärke im (inneren) Punkt x, y, z und ist ϱ die Dichte der Ladung am gleichen Punkt, so ergibt sich aus dem quadratischen Gesetz die Poissonsche Gleichung:

Tatsache, daß die gesamte Ladung sich an der Oberfläche des Leiters befindet, und man kann im ganzen sagen: Die Ladung verteilt sich derart an der Oberfläche, daß für jeden inneren Punkt die Feldstärke überhaupt und daß für jeden Oberflächenpunkt die tangentiellen Komponenten verschwinden.

Die elektrische Feldstärke in jeder Richtung von einem Punkt aus hat die Eigenschaft, gleich der relativen Raumvariation zu sein, die an diesem Punkt und in jeder Richtung von ihm aus das elektrostatische Potential erfährt. Genauer in mathematischer Sprache: Die Feldstärke in jeder Richtung für einen Punkt ist dem negativen Differentialquotienten des Potentials für den Punkt und die betreffende Richtung gleich. Da also für keinen inneren Punkt des Leiters und in tangentieller Richtung für keinen Punkt der Oberfläche eine Feldstärke bestehen soll, so müssen die Raumvariationen des Potentials in dem Leiter und an seiner Oberfläche entlang Null, das Potential selbst muß für den ganzen Leiter konstant sein. Daraus wieder folgt, daß die Leiteroberfläche eine Fläche konstanten Potentials ist, und weiter, daß die resultierende Feldstärke an jedem Oberflächenelement zu diesem senkrecht steht, wie das bereits aus dem Verschwinden der tangentiellen Komponenten direkt zu entnehmen war. Der elektrostatische Zug, der infolgedessen an der Leiteroberfläche angreift, wird durch die elastischen und Kohäsionskräfte des Leiters kompensiert, vorausgesetzt, daß diese Kräfte hierzu ausreichen; und das soll hier angenommen werden.

36. Die nähere Betrachtung des Verhaltens einer Ladung auf dem Leiter führt zu einer Reihe von Erkenntnissen, deren rein physikalische Tatsachengrundlage an und für sich allgemein bekannt ist, welche aber im theoretischen Zusammenhang dieser Schrift eine neue Bedeutung gewinnen.

a) Wird dem Leiter in einem gegebenen Moment eine elektrische Ladung in irgend beliebiger Verteilung zugeführt und von demselben Moment an der Leiter sich selbst überlassen, so erfolgt spontan die Verschiebung in die Gleichgewichtsverteilung mit so enormer Geschwindigkeit, daß es im allgemeinen unmöglich sein wird, den Verlauf der Verschiebung beobachtend zu untersuchen [1]).

$$\frac{\partial X}{\partial x} + \frac{\partial Y}{\partial y} + \frac{\partial Z}{\partial z} = 4\pi\varrho,$$

wenn das umgebende Dielektrikum leerer Raum ist. X, Y, Z sollen überall im Innern verschwinden, also muß die linke und deshalb auch die rechte Seite der Gleichung Null sein: Das Innere des Leiters ist ladungsfrei.

[1]) Der Leiter soll mäßige Dimensionen und einfache Form haben; die Erscheinung der Selbstinduktion soll nicht zu merklich werden. Doch stört es die Überlegung nicht prinzipiell, wenn dem Gleichgewicht einige Oszillationen vorausgehen.

Die Ströme, in denen die reißende Verschiebung besteht, setzen einen Teil der elektrischen Energie in Wärme um (34), und nach einem Zeitintervall, gegen welches eine Sekunde zumeist eine sehr lange Zeitstrecke sein wird, ist die Ruheverteilung erreicht. Bleibt der Leiter auch weiterhin ungestört und ideal isoliert, so ändert sich niemals wieder etwas an diesem Zustand. Auf einem Leiter festbestimmter Eigenschaften, dem ein bestimmter Ladungsbetrag mitgeteilt ist und dessen Ladungszustand nur noch von ihm selbst abhängt, trifft man hiernach entweder eine bestimmte, sich gleichbleibende Verteilung der Ladung an oder aber einen äußerst kurzdauernden dynamischen Verschiebungsvorgang, der gerade auf jene dem Leiter eigentümliche Ruheverteilung hinführt. Es ist also berechtigt, wenn wir diese Verteilung als die „Eigenstruktur" der Ladung auf dem betreffenden Leiter bezeichnen. Läßt sich ein mathematischer Ausdruck finden, welcher über die Eigenstruktur auf dem gegebenen Leiter Auskunft gibt, so soll er die „Eigenfunktion" des Leiters heißen. Diese charakteristische Bezeichnung wird der Theorie der homogenen Integralgleichungen entlehnt, wo sie für den Spezialfall elektrostatischer Anwendungen eben das hier Gemeinte bezeichnet (vgl. 71 ff.). — Über die Natur des dynamischen Verschiebungsprozesses, der auf gegebenem Leiter stets in kürzester Frist die Eigenstruktur herstellt, einerlei von welchem Ausgangszustand der Ladung aus, soll nach der beschränkten Aufgabe dieser Schrift weiterhin keine Untersuchung angestellt, auch keine Hypothese gemacht werden; er dient hier nur als tatsächliche Begrenzung der Eigenstruktur nach rückwärts in der Zeit.

b) **37.** Dem Leiter, dessen Ladung die Eigenstruktur angenommen hat, versuchen wir an einer Stelle der Oberfläche etwas von der Ladung zu entziehen oder hier die Ladung zu verschieben. Der allgemeine Charakter des Erfolges hängt nicht von der Art ab, wie wir das Experiment auszuführen suchen — hiervon wird noch die Rede sein —: Es ist durchaus unmöglich, bei gegebenen Leitereigenschaften die Ladung an einer Stelle für sich zu vermindern, zu vermehren oder zu verschieben; denn auf jede derartige Änderung reagiert die gesamte Eigenstruktur mit einer Verschiebung von eben dem reißenden Verlauf, von welchem die Rede war. Der Ladungsbetrag im ganzen und ohne Rücksicht auf die Struktur läßt sich freilich (vgl. 29) durch Ladungsvermehrung oder -verminderung an einer Stelle vollkommen additiv oder subtraktiv ändern; dagegen gilt von der Eigenstruktur prinzipiell, daß sie, wenn überhaupt von einem Eingriff betroffen, an jedem Punkt der Leiteroberfläche, also als ganze angegriffen wird. Insofern stellt sie das konträre Gegenteil einer summativen Verteilung (z. B. von Dingen) dar, in welcher die Veränderung oder

Entfernung von Stücken alle übrigen Teile unverändert an ihrem Platze läßt (vgl. oben 30). Für den Zustand der Ladung vor dem Eingriff ergibt sich notwendig: Da der Eingriff an jeder Stelle der Oberfläche in dieser Hinsicht denselben Erfolg gehabt hätte, die Eigenstruktur also stets als ganze angegriffen worden wäre, so haben sich die in Eigenstruktur über die Oberfläche ausgebreiteten Ladungen im ganzen gegenseitig „getragen". Oder auch: An jedem Punkt der Oberfläche befand sich in Eigenstruktur der und der bestimmte Ladungsanteil nur insofern, als an allen übrigen Punkten die der Eigenstruktur entsprechenden Ladungen sich zugleich befanden und umgekehrt. Oder endlich: Die Eigenstruktur ist ein physisches Gebilde, welches nur für die Leiteroberfläche als ganze besteht, und deshalb auch selbst nur über die ganze Fläche hin genommen, als Ganzes physisch existenzfähig ist. Da man in naturphilosophischen Schriften bisweilen von einem „Gesetz der Resultante" lesen kann, das die gesamte Physik beherrsche, und zwar in dem Sinne, als lasse sich jedes physikalische Gebilde erschöpfend als die „Summe" von Teilen darstellen, so müssen wir auch umgekehrt noch ausdrücklich hervorheben: Es ist vollkommen unmöglich, die Eigenstruktur auf dem Leiter „zusammenzusetzen", indem man den einzelnen Stellen für sich Ladungsbeträge zuführt. Denn erstens würden die Ladungsanteile für jede Stelle nicht von uns, sondern vom Leiter bestimmt; wir müßten seine Eigenfunktion im voraus kennen. Zweitens würde kein einziger der Ladungsbeträge auch nur einen Augenblick an dem ihm angewiesenen Platz bleiben, solange die anderen, entsprechend gewählten, nicht auch schon ihre Stellen eingenommen hätten, sondern jeder würde, unabhängig von uns, sofort eine Verschiebung durchmachen, deren Sinn im folgenden festzustellen, aber auch schon aus dem Bisherigen zu entnehmen ist. Damit verliert das Wort „Zusammensetzen" seinen Sinn. Nur in dem einzigen Fall eben würde beim Experiment die Verschiebung ausbleiben können, daß wir dem gegebenen Leiter genau die seiner Eigenstruktur entsprechenden Ladungsbeträge an allen Stellen zugleich mitteilten; aber dann haben wir auch die Eigenstruktur als ganze auf einmal hergestellt und eben nicht die Aufgabe gelöst, sie aus Teilen zusammenzusetzen. Dies ist das genaue Korrelat zu der zuerst behandelten Eigenschaft der Eigenstruktur, nicht an einer Stelle für sich gestört oder überhaupt physisch unterteilt werden zu können.

Ich scheue hier keine Widerholung und weise nochmals auf den Kontrast zwischen der rein additiven und der nichtadditiven Seite der betrachteten Systeme hin: Die Ladungsmenge schlechthin ist eine Summe, besteht aus echten Teilen, ist aus ihnen wirklich zusammenzusetzen und in sie wirklich zu zerlegen. Aber die

Eigenstruktur derselben Menge für einen gegebenen Leiter hat als diese Struktur keine echten Teile, ist als diese Struktur nicht wirklich zusammenzusetzen und als diese Struktur nicht wirklich zu zerlegen. — Der Ladungsbetrag als solcher läßt sich ausreichend angeben als: der Teilbetrag „und" der Teilbetrag usw., eine „reine Undverbindung". Die Eigenstruktur der Ladung aber ist nicht beschrieben, wenn man sagt: hier die Ladungsdichte „und" dort die Ladungsdichte usw., — sondern man könnte zu schreiben versuchen: (hier diese, dort jene Dichte usw., alle voneinander abhängig, zum So-Vorhandensein eines jeden an seiner Stelle alle übrigen erforderlich). Offenbar müssen wir es möglichst bald dahin bringen, daß das Gemeinte zur festen Bedeutung eines passend gewählten Ausdruckes wird.

Zur naturphilosophischen Terminologie.

38. Aus alledem folgt, daß die Wahl eines anderen Terminus anstatt des Wortes „Verteilung" eine methodische Notwendigkeit ist, wo die betrachteten Gebilde die angegebenen Eigenschaften haben. Das Natürliche wäre, von der Logik denjenigen Ausdruck zu übernehmen, den diese Wissenschaft, vorzüglich mit der Kategorienlehre beschäftigt, für derartige Untersuchungsobjekte anwendet. Es scheint jedoch, daß Denkgegenstände von gerade dem Typus, mit dem wir es hier zu tun haben, in der Logik noch kaum untersucht sind [1]). Wohl findet man Betrachtungen darüber, wie an sich selbständige „Teile", ohne sich zu ändern, „höhere Gebilde" durch die jeweilige Art ihres Zusammentretens „fundieren" können (vgl. oben 22); aber wie und wann sie zusammentreten, das scheint dabei als beliebig zu gelten, so etwa wie geometrische Kurvenstücke oder „Dinge", die kein physikalisches System bilden, in beliebige Verteilungen gebracht werden können und dabei in irgendeinem Sinne wenigstens geometrische Muster in allen Komplizierungsgraden „fundieren". Hier dagegen ist das reale, physische Bestehenkönnen und Sich-im-Ganzen-Tragen nur eben einer be-

[1]) Außer den entschiedenen Sätzen zur Kategorienlehre, die Wertheimer (Über das Denken der Naturvölker, Zeitschr. f. Psychol. 60, 1910) ausgesprochen hat, findet sich in der Literatur wenig der Richtung nach Ähnliches. Ausführungen Stumpfs (Zur Einteilung der Wissenschaften, 1907) sind vielleicht in ganz verwandter Tendenz gemeint. Krueger (Über Entwicklungspsychologie 1915) weist mehrfach nachdrücklich auf das Kategorienproblem hin. — In Husserls Untersuchungen scheint mir dagegen die Frage kaum gestreift zu werden, von der hier die Rede ist. Die Eigenstruktur für einen gegebenen Bedingungskomplex stellt die Spontangruppierung eines Materials dar; Husserl fragt, soviel ich sehe, inwiefern Stücke, die wir (wie „Dinge") irgendwie postieren, über sich „ein Ganzes" entstehen lassen.

stimmten Spontangruppierung bei gegebener Gesamtbedingung Problem, und da wir hierfür in der Logik kein Wort finden, so wählen wir den Ausdruck „Eigenstruktur“. Es geht nicht an, daß wir in der Logik und Naturphilosophie zwei Gebilde mit demselben Namen belegen, die sich in so fundamentaler und real bedeutsamer Weise unterscheiden, wie alles, was man insgemein eine „Verteilung“, z. B. von Möbeln in einem Raum, nennt und die Eigenstruktur, z. B. der Ladung auf einem gegebenen Leiter. Zwar macht es gar nichts aus, wenn der Physiker von „Elektrizitätsverteilung auf einem Leiter“ auch in Zukunft spricht; denn für den Fachmann sind die realen Eigenschaften einer solchen „Verteilung“ so konkret und geläufig, daß er durch den Namen nicht mehr irregeführt werden kann. Der Nichtphysiker aber, dessen Vorstellung von physischen Gebilden und dessen Wortbedeutungen nicht durch reichlichen Umgang mit typischen physikalischen Systemen, sondern unversehens durch seine gewohnte „Ding“-Umgebung bestimmt werden, müßte notwendig und in jedem Anwendungsfall mit dem Worte „Verteilung“ die Eigenschaften von rein additiven „Dingverteilungen“ verbinden, die dem Ausdruck im geläufigen Sprachgebrauch als Bedeutungsgehalt innewohnen. Sachliche Fehler, unphysikalisch-geometrische Auffassung der physischen Gebilde wären eine natürliche Folge, und eine solche Konsequenz sehen wir ja darin verwirklicht, daß die Logik das vorliegende Kategorienproblem kaum kennt, daß man in der Regel meint, in der Physik gebe es nur sogenannte „Undverbindungen“.

Der eine neue Sprachgebrauch fordert einen zweiten als sein Korrelat. Ebenso wie die Eigenstruktur keine Verteilung im üblichen Wortsinn ist, ebensowenig stellt die Ladung, die in der Eigenstruktur an einer Stelle (auf einem Oberflächengebiet) getragen wird und umgekehrt die übrige Struktur trägt, einen „Teil“ dieser Struktur dar. Das Wort „Teil“ hat vom Umgang mit „Dingen“ her seine sehr konkrete Bedeutung, die wir in unserem individuellen Leben durch eine Verallgemeinerung der Definition nicht wieder in real wirksamer Weise ändern können; erinnern wir uns einen Augenblick nicht an die Definition, so ist auch die tief eingewurzelte Bedeutung wieder da und beeinflußt unser Denken in ganz bestimmter Richtung. Es kommt hinzu, daß sie eine gute und wesentliche Bedeutung ist in denjenigen Fällen, auf die sie paßt, so daß man wiederum sie nicht durch neue Definitionen stören soll. 6 ist ein Teil von 25, der Bleistift für die Erfahrung des Nichtphysikers ein Teil des Zimmerinhaltes, und die elektrische Ladung an einer Stelle, als Betrag schlechthin geprüft, ein Teil des gesamten Ladungsbetrages. Aber die Flächendichte der Ladung an einer Stelle ist keineswegs in

diesem Sinne ein Teil der ausgedehnten Eigenstruktur. Da man bei theoretischen Überlegungen vielfach in die Lage kommen wird, von der Ladungsdichte an einer Stelle der Oberfläche gerade im Hinblick auf die Struktur zu sprechen, in welcher jene Dichte der Stelle überhaupt nur zukommt, so haben wir auch hierfür einen möglichst einfachen Terminus zu suchen. Die etwa in Betracht kommenden Worte der Umgangssprache sind in ihrer nun schon festen Bedeutung allzusehr von der Gewöhnung an die „summativ verteilten Dinge" beeinflußt, ganz ähnlich wie „Teil"; ich schlage deshalb den Ausdruck „Moment der Struktur an einer Stelle" vor, der 1. farblos genug ist, um durch Definition wirklich noch eine Bedeutung annehmen zu können, der 2. doch für andere überhaupt „unselbständige Teile" schon sonst in der Philosophie gebraucht wird (so von Stumpf in der Phänomenologie der Empfindungsinhalte). — Das Moment der Eigenstruktur an einem Punkt (oder auf beschränktem Oberflächengebiet) des Leiters darf also stets nur betrachtet werden mit der bedeutungskonstituierenden und deshalb zukünftig nicht mehr auszusprechenden Voraussetzung: „Getragen von der übrigen Struktur und ebenso umgekehrt diese tragend".

c) **39.** Im allgemeinen ist die Eigenstruktur der Ladung auf einem Leiter durchaus inhomogen, d. h. die Ladungsdichte (das Moment) variiert von Punkt zu Punkt. Jedermann weiß, daß gleichnamige Elektrizitäten sich auseinanderdrängen, und daß deshalb auf Vorsprüngen, Spitzen, Kanten das Moment relativ beträchtlich ist. Daraus ergibt sich, daß die Eigenstruktur der Ladung von der Form des Leiters bestimmt wird, wobei wir unter „Form" im ganz geläufigen Wortsinn die geometrische Beschaffenheit der festen, materiellen Oberfläche aus leitendem Material verstehen, die wir allein zu berücksichtigen haben, solange unsere allgemeine Voraussetzung gilt, daß in der Umgebung der nichtleitende Raum überall aus dem gleichen Dielektrikum besteht. Da es sich aber um die geometrische Beschaffenheit eines physischen Objektes handelt, so wollen wir das Gemeinte „physische Form" nennen. Über deren innere Natur, über die Art des Zusammenseins ihrer Teile machen wir gar keine Annahmen, um uns nicht zu verwirren; für das elektrostatische Problem kommt sie nur durch die Festigkeit in Betracht, mit der sie ihre Oberflächenform und ihr Volumen aufrecht erhält, und diese Festigkeit setzen wir der Einfachheit wegen als praktisch absolut voraus. Um jedes Mißverständnis auszuschließen, können wir noch sagen: Die Beschaffenheit der physischen Form sehen wir als bloße Bedingung an, welcher gemäß sich die Eigenstruktur ausbilden muß. Die beiden Ausdrücke bedeuten also zwei ganz verschiedene Denkgegenstände.

Der allgemeine Ausdruck „physische Form“ anstatt einfach „Leiterform“ wird nur gewählt, weil wir später bei anderen Problemen theoretisch genau entsprechende Begriffe zu verwenden haben, ohne daß es sich dann gerade um elektrische Leitfähigkeit als maßgebende Materialeigenschaft handelte.

Wenn es heißt, das Moment an jeder Stelle der Leiteroberfläche hänge von der Form der Fläche ab, und so sei es z. B. relativ beträchtlich an Stellen starker konvexer Krümmung, dann bleibt dabei im Sinne des Vorausgehenden immer stillschweigend vorausgesetzt, daß das Moment an keiner Stelle nur von der Form an dieser Stelle bedingt sei, daß es vielmehr im Prinzip stets von der Form des ganzen Leiters abhängt. Wegen des Vorurteils, als müsse jedes physikalische Gebilde additiv aufgefaßt werden, sei noch einmal daran erinnert, daß auch einer stark konvexen Leiterstelle ein relativ geringes Moment zugehören kann, wenn die Leiterform an anderen Stellen noch viel stärker zugespitzt ist. Ganz allgemein gilt der Satz: Die Eigenstruktur für eine physische Form ist nicht die Zusammensetzung derjenigen Eigenstrukturen, die irgendwelchen Teilen der physischen Form zugehören würden. Die Eigenstruktur auf einer allein vorhandenen Halbkugel weicht z. B. sehr auffällig von der Struktur auf der Hälfte einer Vollkugel ab. Das folgt ja ohne weiteres schon daraus, daß die Halbkugel scharfe Kanten hat und daß es für ihre Eigenstruktur einen großen Unterschied macht, ob sie massiv oder hohl ist, während hohle und massive Vollkugel genau die gleiche Ladungsstruktur bedingen. Umgekehrt auch wieder: Deformation der physischen Form an einer Stelle erzwingt im Prinzip eine Änderung der Ladungsstruktur auf dem ganzen Leiter.

Andrerseits ist es richtig, daß der strukturbestimmende Einfluß irgendeines Gebietes der Form auf die Ladungsausbreitung in einem anderen Gebiete der Form Funktion der Entfernung zwischen beiden Stellen ist. Je näher sich (unter sonst vergleichbaren Umständen) zwei Formbereiche liegen, um so mehr bestimmt der eine Formbereich die Momente des anderen Formbereiches bis ins einzelne. Deformation einer Formstelle verzerrt deshalb auch die Struktur in der näheren Umgebung des gestörten Bereiches mehr als in größerer Ferne. Das folgt einfach aus der Abnahme des elektrostatischen Feldes mit dem Quadrat der Entfernung.

d) **40.** Die Eigenstruktur der Ladung auf einer gegebenen physischen Form hängt durchaus nicht von der Substanzart ab, aus der der Leiter gebildet ist, ob er also z. B. aus Eisen oder aus Silber besteht. Sie ist ebenso unabhängig von der speziellen

chemischen Natur des umgebenden Nichtleiters, wenn dieser nur homogen ist. Endlich wird sie nicht dadurch beeinflußt, ob die Ladung positives oder negatives Vorzeichen hat, vorausgesetzt, daß die Struktur überhaupt beständig ist; denn bei verschiedenen Arten der Entladung, also bei Vorgängen, welche die Struktur zerstören, kommt ja sehr viel auf den Sinn der Ladung an. — Die Abhängigkeit von Formen und die Unabhängigkeit von chemischen Spezialdaten unterscheiden die elektrostatischen Eigenstrukturen höchst auffällig von der elektromotorischen Kraft zwischen Elektrolyten, die wir als ersten physischen Faktor von Gestalteigenschaften im vorigen Abschnitt kennen gelernt haben. —

e) **41.** Wenn man den Physiker fragte: Welcher Unterschied besteht zwischen der Eigenstruktur zweier Ladungen auf gleicher Leiterform, wenn diese Ladungen verschiedenen Gesamtbetrag haben? — so würde er vermutlich antworten: Selbstverständlich besteht da überhaupt kein Unterschied; die größere Gesamtladung nimmt auf gleicher physischer Form dieselbe Eigenstruktur an wie der geringere Ladungsbetrag. Um aber die Eigenschaften solcher physikalischer Gebilde auch im Sinne unserer Problemstellung vollkommen zu verstehen, wird man näher betrachten wollen, inwiefern diese Angabe etwas Reales, nicht etwa eine bloße Definition „derselben Eigenstruktur“ ist. Wir haben uns bisher als an ein physisches Kriterium daran gehalten, daß ein Eingriff, der zu Verschiebungen der Momente untereinander führt, damit die vorher vorhandene Eigenstruktur stört oder verändert, und daß die Eigenstruktur von einem Faktor oder Geschehen unabhängig ist, wenn diese keine Verschiebung auf der Leiteroberfläche hervorrufen, sondern das „Sich-Tragen“ des ganzen Gebildes unverändert lassen. Man sieht sofort, daß dieses Kriterium auch auf die vorliegende Frage anwendbar ist.

Wir nehmen an, ein bestimmter Ladungsbetrag habe seine Eigenstruktur auf gegebener Form angenommen. Dann erfüllen die Momente im ganzen die Bedingung des „Sich-Tragens“, daß nämlich das Potential für jede Leiterstelle dasselbe sei (35). Wenn also mit σ die (im allgemeinen) von Punkt zu Punkt der Oberfläche variierende Ladungsdichte, mit dS das jeweils zugehörige Element der Oberfläche selbst, und mit r der Abstand dieses Elementes von einem Punkt des Leiters bezeichnet wird, so ergibt das Integral $\iint \frac{\sigma\, dS}{r}$, über die ganze Oberfläche erstreckt, für jede Wahl dieses Leiterpunktes immer den gleichen Potentialwert [1]). —

[1]) Ich nehme die Dielektrizitätskonstante als 1 an.

Denken wir uns jetzt eine Zusatzladung auf dem Leiter derart angebracht, daß die ursprüngliche Dichte überall ihrem ersten Werte proportional vermehrt werde, so fragt es sich, ob gerade die so entstehenden Dichten sich als Momente gegenseitig tragen, also die physisch existenzfähige Eigenstruktur der stärkeren Gesamtladung bilden. Wenn der Proportionalitätsfaktor der Operation α ist, so wird also die Dichte überall $\alpha\sigma$. Das ergibt für das Potential an einem Punkt des Leiters im Augenblick der Operation den Wert $\iint \frac{\alpha\sigma dS}{r}$ oder $\alpha \iint \frac{\sigma dS}{r}$, und da der Integralbetrag $\iint \frac{\sigma dS}{r}$ nach Voraussetzung für jeden Punkt des Leiters der gleiche ist, so gilt dasselbe nach Multiplikation mit der Konstanten α. Bei der zunächst nur gedachten Art der Ladungssteigerung ist also die Dichte für jeden Punkt wirklich so ausgefallen, daß der Leiter wie vorher durchweg konstantes Potential hat und daß deshalb keine Verschiebungen vorkommen. Umgekehrt ist hierdurch die Eigenstruktur der vermehrten Ladung als eine bloße Vermehrung der Momente „am Ort" und durchweg im gleichen Maßstabe dargestellt, ohne daß dabei ihr gegenseitiges „Sich-Tragen" überhaupt tangiert worden wäre, und es folgt, daß die Struktur von dem absoluten Ladungsbetrag und deshalb auch der absoluten Ladungsdichte an jedem Punkt unabhängig ist. — Allzu starke Ladungen würden am Ende den Leiter gewaltsam verlassen oder ihn zerreißen; diesen dynamischen Grenzfall schließen wir von der Betrachtung aus.

Sollte man einwenden, das alles sei doch schließlich eine Abstraktion, wirklich gegeben für eine vorliegende Struktur sei stets nur eine ganz bestimmte Ladung und Dichte, so ist hierzu zu sagen: 1. Die Abstraktion folgt genau dem eben wiedergegebenen, sehr realen Tatbestand, daß Ladungssteigerungen die Momente nicht gegenseitig verschieben. 2. Wenn es sich um eine Abstraktion handelt, so ist sie genau von der Art wie die sicherlich doch real bedeutsame Konzeption eines absoluten Ladungsbetrages ohne Rücksicht auf die Eigenstruktur. Wirklich gegeben, müßte man sagen, ist der Ladungsbetrag immer in einer ganz bestimmten Struktur. Wie wir aber mit sehr gutem Recht davon sprechen, daß ein und derselbe Ladungsbetrag auf zwei verschiedenen Leitern in total verschiedener Eigenstruktur auftritt, genau in derselben Weise und mit derselben Berechtigung hat man zu sagen: Ganz verschiedene Ladungsbeträge nehmen auf gleicher physischer Form die gleiche Struktur an. Beide Behauptungen sind von demselben und beide sind von großem Wert, weil beide auf ganz konkreten Unabhängigkeitsdaten beruhen.

Mathematisch drückt sich der Inhalt dieser Überlegungen sehr einfach auch darin aus, daß in der Eigenfunktion, also dem mathematischen Ausdruck der Eigenstruktur, die Gesamtladung als bloßer Koeffizient vor den entscheidenden Funktionsanteil tritt. Für ein

Ellipsoid mit den Halbachsen a, b, c und bei der Gesamtladung η ist z. B. die Eigenfunktion (Dichte als Funktion der Oberflächenpunkte oder ihrer Koordinaten):

$$\sigma = \frac{\eta}{4\pi abc} \cdot \frac{1}{\sqrt{\frac{x^2}{a^4} + \frac{y^2}{b^4} + \frac{z^2}{c^4}}}.$$

Die Eigenstruktur für verschiedene Gesamtladungen geht also aus der Struktur für die Gesamtladung 1 durch Multiplikation jedes Momentes mit dem jeweiligen Totalbetrag hervor, und daraus folgt ohne weiteres, was oben allgemeiner für beliebige Leiterformen gezeigt wurde. — Es wäre vielleicht richtiger, als Eigenfunktion nicht den Ausdruck für σ, sondern den für $\frac{\sigma}{\eta}$ anzusehen, als Momente also die relativen Dichten zu definieren, und so die rein quantitative Seite der Angelegenheit streng von dem Strukturproblem abzusondern.

Hiernach läßt sich genauer angeben, was für Verschiebungen bei einigen früher behandelten Eingriffen vor sich gehen: Versucht man an einer Stelle der Eigenstruktur einen Ladungsbetrag zu entfernen, so macht stets die gesamte Ladung einen reißenden dynamischen Prozeß durch; es gelingt nicht, die „übrige Verteilung“ an ihren Orten zu lassen, wie das bei „Dingverteilungen“ der Fall wäre. Wir sehen jetzt, daß die eintretende Verschiebung in eine schnelle Wiederherstellung der gesamten Struktur ausläuft; noch schwache Reste einer Ladung werden bei Wiederholung des Eingriffes die vollständige Eigenstruktur für die betreffende physische Form reproduzieren; und das ist ein Vorgang, der seinesgleichen bei „Dingverteilungen“ gewöhnlich nicht hat, der aber seiner allgemeinen formalen Eigenschaften wegen auf die Beachtung des Biologen und Psychologen Anspruch erheben kann. — Ganz entsprechendes Verhalten der Ladungen läßt den Versuch mißlingen, die Eigenstruktur auf einem Leiter aus einzelnen Ladungsbeträgen für verschiedene Stellen nacheinander zusammenzusetzen; die erste geringe Ladung, die wir einer Stelle zuführen, legt sich sofort, ihren eigenen Gesetzen folgend, als vollständige Eigenstruktur über die Oberfläche, und führen wir den einzelnen Stellen nacheinander weitere Beträge zu, so geschieht mit jedem von ihnen ganz dasselbe und ohne unser Zutun; wir erhöhen nur fortwährend die Gesamtladung und das Moment an jeder Stelle, „setzen“ also gewiß nicht die Struktur „zusammen“.

f) **42.** Ganz dasselbe Kriterium wie soeben wenden wir noch einmal an, um genauer festzulegen, in welchem Sinne die Eigenstruktur auf einem Leiter von dessen „Form“ abhängt. Denken

wir uns den gegebenen Leiter dem Maßstab nach verändert, z. B. vergrößert, aber derart, daß der größere Leiter dem kleineren geometrisch ähnlich bleibt; was wird dabei mit der Ladung vorgehen? Der Physiker dürfte auch hier sagen: Die Struktur ändert sich nicht. Wir wollen uns jedoch wieder der konkreten Bedeutung dieses Urteils versichern. Der Vergrößerungskoeffizient jedes linearen Maßes sei β, so verhalten sich homologe Strecken beider Leiter wie $1:\beta$, homologe Flächen wie $1:\beta^2$. Wir machen die Hypothese, auf jedem Oberflächenelement des Leiters bleibe bei der Ausdehnung genau die Ladung, die sich zu Anfang auf ihm befand, die Eigenstruktur auf dem größeren Leiter entstehe also nicht unter gegenseitiger Verschiebung der Momente während der Ausdehnung. — Vor der Operation hatte das Integral $\iint \frac{\sigma\, dS}{r}$, über die Oberfläche erstreckt, d. h. das Potential der Gesamtladung, für jeden beliebigen Punkt im Innern des Leiters denselben Wert; denn sonst wäre die Ladung nicht in Eigenstruktur für den Leiter gewesen. Bei der Dehnung wird dS in $\beta^2 dS$, σ nach der Hypothese in $\frac{\sigma}{\beta^2}$, r in βr verwandelt. Nach der Hypothese würde also das Potential der Gesamtladung auf dem größeren Leiter $\iint \frac{\sigma\, dS}{\beta r}$ oder $\frac{1}{\beta}\iint \frac{\sigma\, dS}{r}$[1]; und da nach Voraussetzung das Integral im letzten Ausdruck für jeden Leiterpunkt den gleichen Potentialwert ergibt, so gilt dasselbe nach Division mit einer Konstanten, also für das neue Potential aller Leiterpunkte unter den Bedingungen der Hypothese. Diese hat danach die reale Eigenstruktur für den vergrößerten Leiter getroffen; die Momente dehnen sich in der Tat je nach ihrem Platze mit diesem und ohne jede Verschiebung gegenüber den Nachbarn; die Eigenstruktur wird von dem Vorgang überhaupt nicht berührt. Was von einer Vergrößerung gilt, bleibt natürlich für eine Verkleinerung richtig, und das Ergebnis ist allgemein: Die Eigenstruktur hängt nur von der Form des Leiters im prägnanten Sinne ab, nur von deren relativen und nicht von ihren absoluten Massen. Wieder dafür kann man sagen: Die elektrostatische Eigenstruktur ist den Raumdimensionen nach transponierbar; sie genügt dem zweiten Ehrenfels-Kriterium für Gestalten.

Man vergleiche hierzu die oben unter e) dem ähnlichen Beweis angefügten Bemerkungen. Die sehr reale Tatsache, daß wieder keine Verschiebungen der Momente gegeneinander auftreten, das „Sich-Tragen“ von

[1]) Die Integration ist nach wie vor über die Oberfläche des ursprünglichen Leiters zu erstrecken.

der Operation nicht tangiert wird, ist der entscheidende Faktor. Man muß nur bedenken, daß die geringste „Deformation" des Leiters, welche die Porportionen nicht wahrt, sofort eine Verschiebung über das ganze Gebilde und eine neue Eigenstruktur bedingt. — Der reale Sinn der aufgestellten Behauptung läßt sich auch folgendermaßen demonstrieren: Spontane Zerstörungen der Struktur hängen von den Kräften ab, die unmittelbar vor diesem dynamischen Geschehen, also noch in der Eigenstruktur bestehen. Wir laden eine Anzahl von geometrisch ähnlichen Leitern (sie sollen weit genug voneinander entfernt sein, um sich nicht wechselseitig zu beeinflussen) mit fortwährend anwachsenden Ladungsbeträgen, bis am Ende die spontanen Entladungen auftreten. Die Zerstörung des ruhenden Gebildes erfolgt auf den verschieden großen Leitern an „homologen Stellen", d. h. an denjenigen Punkten, welche „in der Struktur dieselben" sind. Dieses Geschehen behandelt also gewissermaßen die homologen Punkte als dieselben Punkte, da es sich eben nach der Struktur richtet. — In der Psychologie scheint es bisweilen als sehr merkwürdig angesehen zu werden, daß der wahrnehmende und denkende Mensch, der Selbstbeobachtung nach und ebenso nach dem Zeugnis der äußeren Prüfung, Homologes in transponierten Gestalten als Gleiches behandelt und sich um die Änderung absoluter Daten dabei wenig kümmert. Die eben untersuchten physikalischen Gebilde verhalten sich genau so, wenn das zur Prüfung verwandte Geschehen von der Eigenstruktur abhängt [1]).

g) **43.** Daß die elektrostatische Eigenstruktur auch dem ersten Ehrenfels-Kriterium genügt, ist nach allem Vorhergehenden kaum mehr zu betonen. Es gibt irgendeine Eigenstruktur der Gesamtladung natürlich nur so lange, als die Ladung in einem physikalischen System vereinigt ist. Wird sie in freien Elementarteilen (Elektronen) oder auf kleinen Trümmern der physischen Form derart weit auseinandergebracht, daß die Gruppierung sich in eine rein geometrische Stückverteilung verwandelt, so hat die Ladung selbstverständlich keine physische Struktur mehr, ihre Teile (jetzt durchaus im gewöhnlichen Wortsinn) kümmern sich nicht mehr umeinander, als die Kilometersteine an der Landstraße. Freilich entsteht auf jedem Bruchstück der physischen Form eine „kleine" neue Struktur, die je nach der Beschaffenheit des Bruchstückes ausfällt; aber wenn die angegebene Bedingung erfüllt ist, so hängt diese Struktur nicht mehr von den übrigen Bruchstücken und ihren Ladungen ab, sie ist die „Eigenstruktur" für das Leiterstück allein. Praktisch werden oft Bruchstücke der ursprünglichen physischen Form schon bei einem Abstand von wenigen Dezimetern ihre Eigenstrukturen tragen und von der einen „großen" Struktur zu Anfang wird nichts mehr vorhanden sein. Solange die Stücke einander nicht wieder genähert werden, verhalten sie sich von nun an gegenseitig wie „Dinge".

44. In der Elektrostatik ist jedoch die Grenze für das Bestehen „eines physikalischen Systems" nicht etwa mit „Berührung

[1]) Es ist also auch nicht wunderbar, wenn Tiere es ebenso machen. Vgl. die in 26 zitierte Schrift der Anthropoidenstation.

oder Nichtberührung“ der Leiterteile anzugeben. Denn jedermann kennt die Erscheinungen der Influenz. Stören wir die vorher homogene Umgebung eines stark geladenen Leiters durch Einführung eines zweiten (geladenen oder ungeladenen) Körpers, ohne den ersten dabei zu berühren, so finden wir, daß die Eigenstruktur auf diesem je nach Lage, Form, Ladungsbetrag und Ladungssinn des zweiten in verschiedenem Maße verzerrt erscheint, daß die Ladungen sich verschoben haben und für eine bestimmte Stellung usw. des zweiten Körpers in bestimmter Weise verschoben bleiben. Hätten wir aus irgendwelchen Gründen eine Vorliebe für die Eigenstruktur einzelner kompakter Leiterformen in homogenen Nichtleitern, so könnten wir sagen, in der veränderten Umgebung habe sich auf der ursprünglich gegebenen Form eine „inadäquate“ Struktur ausgebildet. Aber diese Vorliebe wäre unberechtigt, und die sogenannte inadäquate Struktur stellt in Wirklichkeit eine nur unvollständige Struktur dar; erst mit der Ladungsausbreitung auf dem zweiten Körper zusammen ist sie die geschlossene wirkliche Struktur, deren auf beiden Leitern zu berücksichtigende Momente im ganzen einander tragen. Für diese physische Form von größerer Komplizierung aber ist jene „Verzerrung“ das adäquate Strukturverhalten. Wir sahen schon früher, daß die Struktur von der gesamten physischen Form auf einmal bedingt wird, sich nicht aus „Strukturen“ für Formteile zusammensetzt. Manche Diskussion in der Psychologie wäre nicht nötig geworden, wenn man sich bisweilen solcher Beispiele aus der Physik erinnert hätte. — Es versteht sich von selbst, daß auch auf dem zweiten Leiter unter den Umständen des Versuches nicht die Struktur anzutreffen ist, die er im homogenen Isolator, also als Eigenstruktur, haben würde, sondern ein „verzerrtes“ und zugleich unselbständiges Gebilde, welches erst durch die Momente drüben auf dem ersten Leiter zur vollständigen Struktur ergänzt wird. — Bringt man die Leiter allmählich in größere Entfernung voneinander, so verschieben sich die Momente auf beiden fortwährend und lagern sich mehr und mehr in der Art der beiden Eigenstrukturen, bis diese bei genügendem Abstand merklich erreicht werden; wenn dies der Fall ist, haben wir aber zugleich zwei selbständige physikalische Systeme und zwei voneinander unabhängige Strukturen vor uns (genau wie oben im Falle der Bruchstücke eines Leiters). — Was von zwei Leitern gilt, läßt sich leicht auf eine größere Anzahl übertragen; nur werden die Verzerrungen noch größer, und um so weniger kann davon die Rede sein, daß die Struktur für eine Gruppe benachbarter Formen mit irgendwelchen Ladungen das Nebeneinander der „Eigenstrukturen“ für die einzelnen wäre. Da jede gegenseitige Lageänderung der Leiter die Herstellung einer

veränderten physischen Form bedeutet, führt sie zu einer rapiden Umlagerung der Momente durchweg, und man sieht, welche unübersehbaren Vielheiten von Strukturen sich so, selbst bei der Kombination nur weniger Leiter, erzeugen lassen.

Es kommt viel darauf an, daß man als Psychologe mit diesem Tatbestand wohl vertraut ist: Bisweilen wird gegen den Versuch einer psychologischen Gestalttheorie geäußert, er führe notwendig zu einer unbegrenzten Komplikation des Untersuchungsgebietes, in welchem immer neue, nicht additiv aus einfacheren Elementen zusammengesetzte Gebilde anerkannt werden müßten, wenn die neuen Anschauungen zuträfen. Hier, an einem wahrlich durchsichtigen Problem der Physik kann man ohne Rücksicht auf Theorien erkennen, wie es damit bestellt ist: Die Natur, und schon die „unorganische", bringt solchen Reichtum wirklich hervor, ganz unbekümmert darum, ob es leicht oder schwer ist, ihn wissenschaftlich zu erfassen. Das Argument, welches gegenüber der Gestalttheorie auf Forschungsschwierigkeiten hinweist, wird damit hinfällig.

Wie in den früheren Betrachtungen die Leiterform als fest genug vorausgesetzt wurde, um den elektrostatischen Zug zu kompensieren, so habe ich eben angenommen, daß die Leiter für die Zeit einer Strukturuntersuchung in einer festen Lage relativ zueinander durch Hilfskräfte festgehalten werden, damit nicht die ponderomotorischen Kräfte der Ladungen zu Verschiebungen der Leiter selbst führen. Wir kämen sonst ins Gebiet der Dynamik, und zwar im doppelten Sinne, da mit jedem Ortswechsel der Leiter Verschiebungen der Gesamtstruktur auf ihnen allen erfolgen müßten; am Ende würden die bisher entwickelten Anschauungen zur Behandlung des Geschehens auch nicht entfernt ausreichen. — Wird das nichtleitende Material in der Umgebung eines oder mehrerer Leiter inhomogen, variiert also die Dielektrizitätskonstante, so ergeben sich wiederum Strukturverzerrungen, und zur physischen Form als der Grundlage und Bedingung für die Struktur ist in einem solchen Falle auch die Topographie des Isolators zu rechnen. Offenbar stellt jedoch Homogenität der nichtleitenden Umgebung nur einen Spezialfall dieser Topographie dar, und man sieht schon, daß im Grunde immer die Topographie des ganzen Raumgebietes für die Struktur maßgebend ist. Für die philosophischen Ziele der Untersuchung würden wir aus einem Eingehen auf diese Komplizierungen vorläufig wenig gewinnen; denn sie werden ja überhaupt erst zugänglich für das Denken, wenn man sich zu der fundamentalen Problemverschiebung im Sinne Faradays und Maxwells entschlossen hat. Von diesem anderen Gesichtspunkte aus werden die elektrostatischen Fragen im folgenden Kapitel kurz erörtert.

Eine Zusammenfassung dieser elektrostatischen Betrachtung im ganzen führt zu dem Satz: Strukturen von ruhenden Ladungen auf gegebenen physischen Formen sind physikalische Gestalten.

45. Für die zuletzt besprochenen „Gesamtgestalten" war es wesentlich, daß jeder Punkt jedes von mehreren Leitern im elek-

trischen Felde jedes Momentes auf dem gleichen und auf allen übrigen Leitern lag. Dieser Umstand brachte es mit sich, daß auf jedem einzelnen die (unvollständige) Struktur stark von der Eigenstruktur, also der Ladungsausbreitung bei Abwesenheit der übrigen Leiter, abweichen konnte (Influenz). In der praktischen Physik spielt ein ganz anderer Fall von Kombination mehrerer Leiter eine wichtige Rolle, der seines methodischen und theoretischen Interesses wegen bereits hier kurz zu erwähnen ist. Die Ladungsträger werden jetzt leitend miteinander verbunden, so daß sie im Grunde nur einen einzigen Leiter bilden. Aber die Verbindung ist auf das Äußerste beschränkt, wird durch feinste Drähte hergestellt, und zugleich haben die Leiter großen gegenseitigen Abstand. Dann sind erstens die elektrostatischen Ladungen auf den Verbindungsbahnen (samt den von hier ausgehenden Feldern) praktisch wegen ihres winzigen Betrages zu vernachlässigen; zweitens ist die direkte Feldwirkung von jedem Leiter auf die übrigen schwach genug, um ebenfalls unberücksichtigt bleiben zu können. Leitung durch die feinen Verbindungen ist die einzige Beeinflussung, welche die Ladungen des Systems (von Form zu Form) aufeinander ausüben; nur innerhalb jedes einzelnen kompakten Leiters bestehen die unmittelbaren Strukturwirkungen weiter. Wenn man dem System eine Ladung bestimmten Betrages mitteilt, wird eine Strömung durch die Drähte stattfinden, bis überall das gleiche Potential und also der Ruhezustand erreicht ist, aber die Struktur, die die Ladung auf jedem der Leiter annimmt, ist (mit großer Annäherung) die Eigenstruktur eines jeden. Es leuchtet ein, daß es sich hierbei um ein ungemein vereinfachtes Problem handelt, und gerade darauf kommt es dem Experimentalphysiker an, welcher bisweilen leitende Oberflächen von großer Ausdehnung zur Verfügung haben, zugleich aber gegen die (bis ins Unübersehbare komplizierende) gegenseitige Strukturverzerrung geschützt sein will. Wir haben hier das erste Beispiel dafür vor uns, wie die Experimentalphysik mit größter Konsequenz und vollem Erfolg überstarken und unbequemen Gestalterscheinungen aus dem Wege geht; zu diesem Zwecke können die betreffenden Leiter noch in sehr einfachen Formen gewählt werden, für die die Eigenfunktion wohlbekannt ist. Das angegebene Verfahren führt jedenfalls zu Leiterkombinationen, in denen die Eigenfunktionen nach wie vor die Ladungsausbreitung auf den einzelnen Formen richtig angeben. Entschieden ist damit ein sehr praktischer Fortschritt in Richtung auf additives Verhalten des Systems erreicht. — Was zwischen den einzelnen Leitern auszumachen bleibt, ist die Frage nach den Ladungsbeträgen (für jeden), bei welchen das ganze System gleiches Potential annimmt. Hier freilich erweist sich bei etwas näherer Überlegung, daß das ganze

Gebilde als solches doch immer noch einfachste Gestalteigenschaften hat, wenn schon die Vermeidung gegenseitiger direkter Feldeinflüsse das eigentliche Strukturproblem auf die einzelnen Leiter beschränkt. Von derartigen „schwachen Gestalten" ist später noch ausführlich die Rede.

Drittes Kapitel.

Die Feldstrukturen.

46. Solange man das elektrostatische Problem nur von dem Standpunkt ansieht, der im vorigen Abschnitt durchweg beibehalten wurde, macht es den Eindruck einer recht speziellen Angelegenheit. In der Absicht, allmählich weitere Ausblicke auf das Gebiet physischer Gestalten überhaupt zu gewinnen, betrachten wir eine andere Seite der elektrostatischen Phänomene, nämlich die „Felder" in der Umgebung von Leitern, deren Ladung die Eigenstruktur angenommen hat. Diese Ladung, als eine Art elektrischen Stoffes, erscheint denjenigen, welche an den Umgang mit „Dingen" und „Dingverteilungen", aber nicht an den mit rechten „physikalischen Systemen" gewöhnt sind, leicht als das eigentlich „Wirkliche", dessen Eigenschaften vor allem zu studieren sind, und genau so erging es einst den Physikern bis zu Faraday, der als erster „niemals Körper als existierend ansah mit nichts zwischen sich als ihrer Entfernung voneinander" [1]), sondern das „Kraftfeld" um eine Ladung (einen Magnetpol, einen elektrischen Strom) oder zwischen mehreren anstatt als mathematische Fiktion als einen reellen Zustand des Mediums auffaßte. Das stoffartige „Medium", der Äther, hat inzwischen als Gegenstand theoretischer Bemühungen eine wechselvolle Geschichte durchgemacht. Je mehr es der Gegenstand von Experimenten wurde, um so merkwürdiger erschienen seine Eigenschaften, verglichen mit denen anderer Substanzen, und zuletzt versagte es in entscheidenden Versuchen ganz: das spezifische Medium für Felder scheint als eine Art überall verbreiteten materiellen Substrates nicht zu existieren. Um so besser hat sich die Realität des Zustandes (des Geschehens) bewährt, den man „Feld" (Feldverschiebung) nennt, und auch vom philosophischen Standpunkt kann man unbedenklich „real" nennen, was (bei Abwesenheit von beeinflussenden Körpern) etwa $33 \cdot 10^{-7}$ Sekunden braucht, um einen Kilometer weit fortzuschreiten. Auch die Legitimation der besten Realitäten geht am Ende darauf zurück, daß man dergleichen Konkretes und Bestimmtes von ihnen zugeben muß.

[1]) Maxwell, Electricity and Magnetism (3. Aufl.) II, S. 177.

Übrigens hatte Faraday selbst anscheinend zwei theoretische Vorstellungen von der Natur der Felder: Die eine, welche Maxwell für Jahrzehnte zur Herrschaft in der Physik brachte, und nach welcher in der Umgebung von elektrischen Ladungen, Magnetpolen und elektrischen Strömen die Eigenschaften eben des Äthers modifiziert werden, und eine andere von so großer Kühnheit, daß sie selbst Maxwell allzu radikal vorkam: „Er spricht sogar von den Kraftlinien, die zu einem Körper gehören, als wären sie gewissermaßen ein Teil von ihm, so daß man bei seiner Wirkung auf entfernte Körper nicht sagen kann, er wirke, wo er nicht ist“ [1]). Maxwell korrigiert die, wie er meint, unglückliche Ausdrucksweise; aber wenn man einmal ganz naiv überlegt, weshalb denn die „Grenzen eines Körpers“ gerade nur die Grenzen seiner elastischen und chemischen und nicht ebensogut auch die seiner elektrostatischen oder magnetischen Wirksamkeit sein sollen — diese Frage scheint sich Faraday gestellt zu haben —, wird man jenen Gedanken so ungeheuerlich gar nicht finden können [2]). Freilich widerspricht er entschieden unseren Denkgewohnheiten.

Das ist alles, was für unseren Zusammenhang im voraus sichergestellt sein muß: Wir können — in Übereinstimmung mit der gegenwärtigen Physik — das Feld und seine Eigenschaften als physische [3]) Untersuchungsobjekte behandeln. Was dagegen das Wesen oder die innere Natur der Felder ist, bleibt ganz den weiteren Forschungen der kompetenten Einzelwissenschaft als ihr Problem überlassen. Es wird sich noch immer mehr herausstellen, in welchem Maße unabhängig die hier behandelte Frage von irgendwelchen speziellen physikalischen Hypothesen ist; wir halten uns deshalb vorzüglich an die gesicherten Gesetze.

Wenn eine Ladung die Eigenstruktur des betreffenden Leiters soeben angenommen hat, finden wir praktisch sofort die nähere Umgebung, welche freier Raum sein oder auch aus nichtionisierter Luft bestehen mag, von einem ruhenden Felde durchsetzt, und die Eigenschaften des Feldes erweisen sich eindeutig bestimmt durch die Eigenstruktur der Ladung, also nach dem vorigen Kapitel auch durch die Leiterform. In der Maxwellschen Theorie liegt ganz im Gegensatz zu unserer bisherigen Betrachtungsart alles Gewicht auf den Eigenschaften dieses Feldes, und die Struktur von Ladungen auf dem Leiter wirkt in diesem Vorstellungskreis geradezu als mathematische Fiktion, ähnlich wie umgekehrt das Feld in der elektrostatischen Theorie vor Faraday. Aber eines wie das andere scheint eine einseitige Anschauungsweise gewesen zu sein; in der Synthese von H. A. Lorentz, die man die Elektronentheorie nennt, treten die Struktur der Ladung und die Eigen-

[1]) An der gleichen Stelle von Maxwells Werk.

[2]) E. Becher hat sich jüngst zu einer ähnlichen Anschauung geführt gesehen. (Kultur der Gegenwart, Naturphilosophie, S. 318ff., 1914.)

[3]) Im Gegensatz zu geometrisch-mathematisch.

schaften des Feldes als zwei untrennbare, gleich reale Seiten eines einzigen Gebildes auf[1]).

47. Welche Faktoren ein Feld charakterisieren, müssen wir uns kurz in Erinnerung rufen, ehe wir betrachten, wie sich Feldeigenschaften und Gestaltproblem zueinander verhalten. Die Bedingungen des Gleichgewichtes auf einem Leiter waren in eine einzige für das Potential auf und in ihm zusammenzufassen, das Potential im Falle der Eigenstruktur mußte für den ganzen Leiter konstant sein. Genau ebenso wird der Zustand des umgebenden Feldes bei weitem am einfachsten durch Potentialbedingungen charakterisiert. Überall, wo keine Ladungen anzutreffen sind, also nach unseren Voraussetzungen im Felde des Leiters, muß das Potential V der partiellen Differentialgleichung genügen:

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} = 0,$$

welche man die Laplacesche Gleichung nennt und in der kurzen Schreibweise der Vektoranalysis durch $\Delta V = 0$ wiedergibt[2]). Dieser Gleichung muß das Potential im Felde ohne Rücksicht auf den speziellen Fall, die spezielle Leiterform und deshalb auch die spezielle Ladungsstruktur immer entsprechen; aber jene Form (und diese Struktur) erfordern im Einzelfalle, daß von der Oberfläche des bestimmten gegebenen Leiters an und durch ihn hindurch dasselbe V eine Konstante werde, und deshalb muß es jedesmal — je nach der Form — eine andere Funktion V sein, die als Lösung der allgemeinen Bedingungsgleichung $\Delta V = 0$ zu wählen ist. Endlich soll in größter Ferne das Potential V wie $\frac{1}{r}$ verschwinden, wenn r die Entfernung von der Leiteroberfläche ist.

48. Kennt man das Potential V in Form einer stetigen Funktion durch das ganze Feld hin, so lassen sich dessen Eigenschaften durch Zeichnungen veranschaulichen, die allerdings nur ebene Durchschnitte durch das dreidimensionale Feld geben und deshalb stark an Wert verlieren, sobald die Leiterform (und damit das Feld) keine ausgeprägten Symmetrieeigenschaften besitzt. Wir wollen hier kurz voraussetzen, daß die Zeichnungsebene Symmetrieebene des Feldes sei. Dann zeigt der ebene Schnitt zwei Kurvenarten von fundamentaler Wichtigkeit, die Kurven konstanten Potentials (ebene Spuren der Äquipotentialflächen im Raum) und dazu senkrecht die Kraftlinien, deren Richtung an jeder Stelle die Richtung

---

[1]) In anderer Hinsicht ist die Elektronentheorie viel mehr als eine solche Synthese älterer Anschauungen.

[2]) Die Ableitung der Laplaceschen Gleichung kann ich hier nicht darstellen; man vergleiche z. B. die „Physik" von Chwolson, Bd. IV.

des Feldes, deren Dichte überall die Feldstärke angibt. Würde die Zahl der Schnitte (etwa stets in gleichen Abständen) immer mehr vermehrt, so erhielte man eine Übersicht über das Feld, die methodisch einigermaßen analog wäre den mikrotomischen Schnittserien durch gehärtete Teile des Zentralnervensystems [1]). — Die Äquipotentialkurven der Schnitte zeigen, wie sich um die Leitergrenze, als die erste von ihnen, Schlinge um Schlinge legt, auf der das Potential einen bestimmten Wert hat und auf der es deshalb um einen konstanten Betrag vom Potential auf den beiden Nachbarkurven abweicht. Erst bleiben die Linienzüge in ihrem Verlauf der Leitergrenze ähnlich, weiterhin gleichen sich allmählich die Einbuchtungen und Wölbungen aus, die jene etwa aufwies, bis in der weiten Ferne eine Abweichung von Kreisen (als den Durchschnitten von Kugeln) nicht mehr merklich ist. Das Auge ruht mit merkwürdigem Gefallen auf der leichten und sicheren Folge solcher Kurven, in die sich geladene Leiter nach „blindmechanischen Naturgesetzen“ so einzuhüllen pflegen, daß man „besser zueinander gehörige“ Raumformen nicht leicht finden könnte.

Die Kraftlinien, welche überall die Richtung von $-\frac{\partial V}{\partial n}$ angeben (n soll die Normale der Äquipotentialflächen bedeuten) und deshalb auf jeder Niveaukurve, von der Leiterbegrenzung angefangen, senkrecht stehen, sind naturgemäß bekannt, wenn man erst das Potential als Funktion der Raumkoordinaten kennt, und erleichtern das anschauliche Erkennen von Feldeigenschaften, die im Grunde auch aus der ersten Kurvenfamilie zu entnehmen wären. — Ich setze Bilder solcher Familien als bekannt voraus [2]).

Welchen physischen Wert haben die Bilder? Es scheint nichts so sehr der Verurteilung als bloße Fiktion ausgesetzt wie diese Kurven, und der Grund dafür mag historisch in gewissen grob veranschaulichenden Übertreibungen liegen, nach welchen „die Kraftlinien wie Gummifäden durch den Raum gespannt wären“, eine Vorstellung, die mir nicht allein etwas plump, sondern auch irreführend in physikalischer Hinsicht erscheint. An den Kurven an und für sich aber ist für den Standpunkt der gegenwärtigen Physik nichts fiktiv als ihre Diskretheit und Individualität [3]). Die stammt nur daher, daß wir anders die quantitativen und die

[1]) Wo die Feldrichtung nicht in die Schnittebene fällt, erhält man als Vertreter des Feldes in der Ebene bloße Punkte.

[2]) Man vergleiche vor allen anderen die Felddarstellungen in beiden Bänden von Maxwells Hauptwerk, neben den elektrischen auch die elektromagnetischen Bilder.

[3]) Erst in neuester Zeit hat ein englischer Physiker um der Energiequanten willen die Hypothese diskreter Kraftlinienindividuen aufgestellt.

Richtungseigenschaften des Feldes nicht recht zeichnen könnten, und ist im einzelnen von willkürlichen Einheiten (für Ladungen, Feldstärken, Potentiale) und von der Genauigkeit bestimmt, welche die Zeichnung erreichen soll. Das ruhende elektrostatische Feld um einen Leiter hat gewiß noch nirgends Individuen und also Unstetigkeiten im Raume gezeigt, aber der mehr oder minder schnelle Abfall des Feldkontinuums durch das Feld hin und die Richtungen, in denen er hier steil, dort ganz allmählich erfolgt, die lassen sich so genauer erfassen als bei irgend anderer Darstellungsweise und für einen Gesamtüberblick weit besser als aus der analytisch gegebenen Potentialfunktion.

Niveaukarten mit Höhenlinien von 100 zu 100 m haben auch einen sehr realen Sinn, und es wird niemand sie schlechthin Fiktionen nennen, als würde mit ihnen behauptet, nur alle 100 m treffe man auf reale Gebirgshöhen.

Denkt man sich schwarz auf weiß die Kurvenfamilien in immer größerer Zahl der Individuen gezeichnet, so wird allmählich der Bildcharakter geändert, und das Linienbild geht in ein Feld von Helligkeitsnuancen über, welche einzelne Kurven höchstens an „schwachen" Stellen noch unterscheiden lassen. Der Stetigkeit des Feldes (außerhalb des Leiters) würde diese Art der Veranschaulichung besser gerecht werden, und man könnte Komparatives auch an ihr mit einem Blick entnehmen lernen, aber wir wissen, daß an Vielseitigkeit der Verwendbarkeit und Zuverlässigkeit eine Darstellung in Raumformen einer Abbildung in Farbschattierungen weit überlegen bleiben muß. Drückt man übrigens bei Betrachtung von guten Feldbildern, die genug Kurven enthalten, die Augen ein wenig zusammen, so ergibt sich schon ein Schattierungsbild, das als annähernd kontinuierlich gelten kann. Man macht sich auf diese Weise anschaulicher, daß etwas physisch Reales, nicht Darstellungen analytischer Funktionen allein, in so charakteristischer Weise um die Leiterform konzentriert liegt.

49. Ohne Rücksicht darauf, ob die Charakterisierung des Feldes durch Potentiale oder „Kraftfluß" erfolgt, ergibt sich jetzt die Frage, ob die betreffenden charakterisierenden Größen im Ruhezustand des Feldes durch dieses hin in bestimmter Weise „verteilt" sind (vgl. oben 38), oder ob das Feld eine „Struktur" hat.

Erstens ist vom Standpunkt der Maxwellschen Theorie die Antwort nicht fraglich: Nach ihr ist das ganze elektrostatische Problem und sind die Eigenschaften elektrischer „Ladungszustände" durchweg zu deuten aus „Verschiebungen", die im Äther rapide erfolgen, bis die Drucke und Spannungen in diesem Medium sich ins Gleichgewicht setzen, und nun die Feldbeschaffenheit an jedem Punkte das übrige Feld „trägt" und von diesem „getragen wird", als Moment einer dreidimensionalen physischen Struktur. Diese hat nun alle Gestaltmerkmale, die wir bisher der Eigenstruktur der Ladung auf dem Leiter zuschrieben, die Ladung wird zu einer Art Hilfsvorstellung erniedrigt, die wahre Eigenstruktur für eine gegebene Form ist die des Feldes zwischen der Leiteroberfläche

und der Ferne ringsum. — Ich weiß nicht, ob oft in der Geschichte der Wissenschaft ein Problem derart ausgehoben und auf den Kopf gestellt wurde; aber für die prinzipielle Strukturfrage ist das vollkommen einerlei, sie ist nach wie vor im positiven Sinne zu beantworten; denn die Beobachtungen, auf die es ihr ankommt, muß jede Theorie anerkennen.

Vielleicht kann man jedoch folgendes behaupten: Gerade Maxwell zeigt in der Behandlung der elektrischen (und magnetischen) Probleme durchweg eine Tendenz, gestaltmäßig zu denken, oder, besser gesagt, sich des Strukturprinzips als einer wesentlichen Kategorie bewußt zu werden. Das mag damit zusammenhängen, daß er gewohnt war, physische gegenüber rein geometrischen Gesichtspunkten scharf zu betonen. Rein geometrisch arbeitende Köpfe neigen zu summativer Auffassung; wer das „Real-Dynamische" der Natur stärker fühlt, und von bloßer Mathematik zu scheiden weiß, wird weit eher gestaltmäßig über das Physische denken. — Vielleicht kommt diese Richtung bereits in den ursprünglichen Konzeptionen Faradays ebenso zum Ausdruck; jedenfalls wird sie an einigen Stellen des Maxwellschen Lehrbuches ganz auffällig merkbar, und ich möchte nicht unterlassen, die folgenden Sätze aus diesem Werke wiederzugeben:

„Wir sind gewohnt, das Universum als aus Teilen zusammengesetzt anzusehen, und Mathematiker beginnen gewöhnlich mit der Betrachtung eines einzelnen Teilchens, richten sich dann auf seine Beziehung zu einem anderen Teilchen usw. Es erfordert jedoch einen Abstraktionsprozeß, ein einzelnes Teilchen herauszufassen; denn alle unsere Wahrnehmungen beziehen sich auf ausgedehnte Körper, so daß der Begriff unseres Bewußtseinsganzen für einen gegebenen Augenblick vielleicht ein ebenso primärer Begriff ist wie der von einem individuellen Ding. Deshalb könnte es auch eine mathematische Methode geben, in der wir vom Ganzen zu den Teilen fortschreiten, anstatt von den Teilen zum Ganzen." Maxwell bringt dann seine bevorzugte Methode, von partiellen Differentialgleichungen als Bedingungen für das stetige Feld auszugehen, mit diesem Gedanken in Beziehung[1]). Er scheint die Vorstellung von realen Ladungen als dieser Anschauungsweise prinzipiell entgegengesetzt empfunden zu haben, und gar die Konzeption von Elektrizitätsatomen weist er einmal etwas unsanft ab[2]). Ich sehe jedoch keinen entscheidenden Grund, weshalb z. B. die Anerkennung einer Elektronentheorie — es kann deren mehrere geben — nicht vollkommen mit dem Strukturprinzip vereinbar sein sollte.

Nimmt man zweitens den Standpunkt der Elektronentheorie ein und sieht die Ladungen an der Leiteroberfläche für reale Gebilde an, so wird an jenem Ergebnis abermals nichts geändert. Anstatt einer Ladung, auf deren Momente an der Oberfläche es allein ankäme, und deren Feld draußen rein mathematischer Anhang ohne Realität wäre, breiten sich die Ladung auf der Oberfläche und ihre zugehörige Feldhülle zu einer einzigen Eigenstruktur aus. Denn wenn wir an diesem Gebilde irgendwo, sei es an der Ladung (auf dem Leiter) oder im Felde einen Eingriff vornehmen,

[1]) A. a. O. II, S. 176.
[2]) A. a. O. I, S. 380.

so erweisen sich für diese weit ausgedehnte Struktur die allgemeinen Sätze immer noch richtig, die wir früher nur für die Ladung abgeleitet haben: Ein Eingriff ändert im Prinzip entweder die Struktur überhaupt nicht, oder er bedingt eine Verschiebung durch ihre ganze Ausdehnung hin, für die Ladung und für das Feld ringsum[1]). Die Ladungsstruktur allein zu betrachten, wie wir es der Einfachheit wegen zunächst taten, ist also sachlich im Grunde nicht statthaft. Die ganze Ladung kann, so und so über den Leiter erstreckt, nur dann ruhen, wenn das umgebende Feld draußen die Struktur vollendet. — Das ist z. B. nicht mehr der Fall, sobald durch Näherung eines zweiten Leiters oder durch Veränderung der Dielektrizitätskonstante in einem Raumteile die Feldstruktur angegriffen wird (vgl. oben 44), und auf diese Weise wird es verständlich, weshalb zur physischen Form, oder allgemeiner physischen Topographie, Daten über den Raum um die Leiter herum gehören.

50. Die Struktur läßt sich durch Ladungsdichten und Potentialwerte oder Feldrichtungen (Feldstärken) für jeden ihrer Punkte beschreiben; doch ist dabei eine Seite des gleichen Gebildes noch unbeachtet geblieben, deren Bedeutung der Fernerstehende nicht sogleich bemerkt, ehe er auf sie hingewiesen ist. Die Ladung eines Leiters besitzt auch im Zustand der Ruhe einen gewissen Betrag von elektrischer (potentieller) Energie. Deren Ort war in der älteren Elektrostatik sozusagen selbstverständlich der Leiter oder doch seine Oberfläche als der Ort der (damals) allein wichtigen Ladung selbst.

Der Betrag der Energie hängt (außer von der Ladungsmenge) durchaus von der Form des Leiters ab, und also von der Eigenstruktur, die die Ladung auf ihm annimmt, indem stets so viel Energie bei der Strukturausbildung in die Modifikation Wärme übergeht, wie der Differenz zwischen der anfangs vorhandenen Energie überhaupt und der zurückbleibenden elektrostatischen Energie entspricht. Nun haben wir aber gesehen, daß es eine Ruhestruktur der Ladung für sich allein — ohne die des Feldes — gar nicht gibt, und so wird man von vornherein besser sagen wollen, die elektrostatische Energie werde durch die vollständige Eigenstruktur, mit Einschluß des Feldes also, bestimmt. Ist das der Fall, dann wird man aber auch den Ort der Energie nicht auf dem Leiter allein, sondern überall in der Struktur suchen, genauer in dem Gesamtraume zwischen der Leiteroberfläche und der unendlichen Ferne ringsum. Das ist die Anschauung der gegenwärtigen Physik, und wenn es irgendeinen Wandel in der Grund-

[1]) Von einer gewissen Einschränkung dieses Satzes ist später (69) die Rede.

auffassung der Erscheinungen gibt, der nicht leicht wieder rückgängig werden kann, so dürfte es der eben angegebene sein: „Realität der Felder“ und „Lokalisierung von Energie im Felde“ sind weder historisch noch sachlich Ausdrücke von wesentlich verschiedener Bedeutung.

Am einfachsten, wenn schon nicht in anschaulicher Weise, bestimmt man die spezielle Lokalisierung der Energie im Felde auf mathematischem Wege [1]):

Wenn in einem Raumgebiet (mit dem Volumenelement $d\tau$) und innerhalb von dessen Grenzfläche (mit dem Flächenelement dS) V eine Funktion von den mathematischen Eigenschaften eines Potentials ist ($\Delta V = 0$), so leitet man aus dem Gaußschen Integralsatz die Gleichung ab:

$$\iiint \left[\left(\frac{\partial V}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial z}\right)^2\right] d\tau + \iint V \frac{\partial V}{\partial n} dS = 0.$$

Hier ist das erste Integral durch das Raumgebiet, das zweite über dessen Begrenzungsfläche zu erstrecken, und n ist die Normale zu dieser Fläche, nach innen gerechnet. Die Gleichung bleibt bestehen, wenn es sich um den Raum nicht innerhalb der Begrenzungsfläche, sondern um das Gebiet zwischen ihr und einer unendlich weit entfernten zweiten Grenze handelt [2]), vorausgesetzt, daß wieder V Potentialeigenschaften in diesem Raume besitzt (in der weiten Ferne verschwindet), und daß n in das nun betrachtete Gebiet hineingerichtet wird. Die Summe der Quadrate im Raumintegral ist aber nichts anderes als das Quadrat der resultierenden Feldstärke $\mathfrak{E}$ an jedem Feldpunkt; das Oberflächenintegral ferner wird über die Leiteroberfläche genommen, wo (bei Eigenstruktur) V eine Konstante V_c (nämlich das Potential des Leiters) und bei einer Gesamtladung η das Integral $\iint \frac{\partial V}{\partial n} dS$ gleich $-4\pi\eta$ ist (Gauß). So folgt:

$$\frac{1}{2} V_c \eta = \frac{1}{8\pi} \iiint \mathfrak{E}^2 d\tau.$$

Die linke Seite ist der bekannte Ausdruck der Elementarphysik für die potentielle Energie der Ladung, die rechte ein Raumintegral durch das ganze Feld. Jene Energie kann also (und muß gegenwärtig) aufgefaßt werden als der Gesamtbetrag (Integral) einer Energie, die durch das ganze Feld in bestimmter Art ver-

---

[1]) Vgl. Maxwell, a. a. O. I, S. 135 f.

[2]) Das hinzukommende Flächenintegral ist Null. (Vgl. z. B. Goursat, Cours d'Analyse Mathématique [2. Aufl.] III, S. 257.)

breitet ist, und von der sich, auf die Volumeneinheit berechnet, überall $\frac{\mathfrak{E}^2}{8\pi}$ findet[1]). Nun ist $\mathfrak{E}$, die Feldstärke (mitsamt den Ladungen, von denen sie ausgeht), in nichtadditiver Weise durch den Raum hin gelagert, also muß man das gleiche von der Energie sagen, deren Dichte an jeder Stelle ja nur von dieser Variablen abhängt, und kommt zu dem Schluß: Zu einer gegebenen Form, welcher Ladung zugeführt ist, gehört eine Eigenstruktur der Energie im umgebenden Felde. — Dies ist vielleicht die angemessenste Art, das elektrostatische Gestaltproblem zu formulieren, da bei dieser Ausdrucksweise nicht Ladungsmomente einerseits und Potentialwerte oder Feldrichtungen andererseits für die verschiedenen Punkte der Struktur anzugeben sind, sondern sozusagen eine einzige Sprache zur Angabe der Momente für die ganze Gestalt zutreffend bleibt. Zugleich erreichen wir einen Ausblick weit über das enge Gebiet der Elektrostatik hinaus: Wohl die fundamentalste unter allen physikalischen Größen kann in Struktur auftreten. Eben sie wirkt in dem Bilde von Physik, das der Außenstehende zu haben pflegt, geradezu wie das Schulbeispiel alles Additiven, und der berühmte Erhaltungssatz, den jeder kennt, besagt ja wirklich ein absolut summatives Verhalten der Energiebeträge schlechthin und im ganzen. Aber dafür lehrt er auch gar nichts über Energiestrukturen, von denen vielmehr planmäßig abgesehen wird, wenn eine Energiebilanz in seinem Sinne abzuschließen ist. Er behandelt nur eine Seite an der Natur, wenn schon wahrlich eine wichtige; für das Naturgeschehen aber haben die Strukturen, in denen Energie auftritt, durchaus ebenso große Bedeutung wie ihre absoluten Beträge oder wie die Energiearten in einem System.

51. Damit ständig konkret bleibe, welchen sachlichen Gehalt diese allgemeinen Behauptungen haben sollen, stelle ich noch einmal die im vorigen Kapitel abgeleiteten charakteristischen Eigenschaften von physikalischen Gestalten dieses Gebietes zusammen[2]). Als „gestaltetes Material“ kann jetzt sowohl das Feld, wie die Ladung, wie die elektrostatische Energie angesehen werden; für diese letztere soll die Formulierung geschehen:

a) Auf einem Leiter und in seiner (als homogen vorausgesetzten) Umgebung wird die Energie entweder in der Eigenstruktur für eben die Leiterform oder allenfalls in schnellster Verschiebung auf diese Struktur hin angetroffen.

---

[1]) Die Dielektrizitätskonstante ist gleich 1 angenommen.

[2]) Die Übersicht erhebt keinen Anspruch darauf, auch nur entfernt vollständig zu sein.

b) Die Energiestruktur als solche läßt sich weder realiter „teilen“ noch „zusammensetzen“ im reinen Sinne dieser Worte; denn die Strukturmomente tragen einander (ein jedes die ganze übrige Struktur, diese jedes Moment), und ein lokaler Eingriff, im Sinne jener Worte, stört die Struktur als ganze.

c) Die Energiestruktur hängt von der gegebenen physischen Form (allgemeiner: der physischen Topographie) ab, und zwar im ganzen und als ganze.

d) Sie ist unabhängig vom Material des Leiters und von dem Vorzeichen der Ladung.

e) Sie ist unabhängig von dem Gesamtbetrag der Ladung [1]).

f) Sie hängt nur von den relativen Massen der physischen Form, nicht von deren absolutem Maßstab ab; damit wird sie räumlich transponierbar und genügt dem zweiten Ehrenfels-Kriterium für Gestalten.

g) Sie genügt dem ersten Ehrenfels-Kriterium für Gestalten. Denn es versteht sich von selbst, daß eine Energiestruktur (im oben 36 ff. angegebenen Sinne) nur für die Energie eines in sich physisch zusammenhängenden (physikalischen) Systems bestehen kann [2]). Sind andererseits zwei oder mehr Leiter nicht in sehr großer Entfernung voneinander postiert, so bilden sie mit dem Zwischen- und Umraum ein physisches System, dessen Energiestruktur je nach den Bedingungen von der Summe der Eigenstrukturen der einzelnen Leiter (also der Gestalten, die jedem allein zukämen) auf die verschiedenste Weise abweichen muß [3]).

Viertes Kapitel.

Verifikation an der experimentellen Methodik.

52. Wenn die Untersuchungen der beiden letzten Abschnitte zuverlässig gewesen sind, und man mit Recht von Strukturen oder Gestalten (als nichtsummativen Gebilden) in der Elektrostatik sprechen kann, dann muß dieser Charakter der untersuchten physischen Zustände ohne jeden Zweifel auch der Methodik besondere Züge verleihen, mit deren Hilfe der Physiker solche Gebilde erforscht. Diese Erwartung wird durchaus bestätigt, und zwar

[1]) Der Energiebetrag ist natürlich Funktion der Ladungsmenge. Ebenso hängt er von der Dielektrizitätskonstante ab.

[2]) Energiebeträge können nach Belieben auch für Systemvielheiten ohne jeden physischen Zusammenhang unter sich addiert werden.

[3]) Hat die Umgebung nicht durchweg die gleiche Dielektrizitätskonstante, so weicht die Struktur ebenfalls von der „Eigenstruktur“ ab.

ebensowohl in einer Betrachtung der dürftigen experimentellen Methoden für dieses Gebiet wie der ungleich wertvolleren mathematisch-theoretischen Denkwege, die zu seiner Untersuchung bisher gefunden wurden. Die erste Gruppe soll vorweg behandelt werden.

Kein einziges Sinnesorgan des Menschen wird im allgemeinen von einem ruhenden elektrostatischen Felde merklich beeinflußt. Eine höchst empfindliche Reaktion auf starke Felder tritt erst dicht an der geladenen Oberfläche ein, wenn der menschliche Körper durch seine Annäherung längst vorher die Eigenstruktur des Untersuchungsobjektes (Feld und Ladung) verzerrt und damit schon zerstört hat, was eigentlich untersucht werden sollte. Die fühlbare Entladung aber gibt auf keinen Fall ein zureichendes Bild davon, welche Struktur des Augenblickes vorher in dieser Entladung vernichtet wird. Schon hieran zeigt sich, daß gerade die außerordentlich starken Gestalteigenschaften elektrostatischer Energie zu großen methodischen Schwierigkeiten führen müssen.

53. Die natürlichste Art physikalischer Feststellungen, die optische, beruht darauf, daß die untersuchten Objekte stark zusammengesetztes Licht natürlicher oder künstlicher Lichtquellen gemäß ihren Orten, ihren Formen und der (im allgemeinen lokal verschiedenen) selektiven Absorption reflektieren, und da reflektierende Flächen und reflektierte Strahlungen sich dem untersuchten Vorgang gemäß zu verhalten pflegen, so können wir sehen, daß Wasser und Quecksilber sich im Kapillarrohr verschieden benehmen usw. Daß wir das Untersuchte sehen, daß also ein Teil der reflektierten Strahlung andere Schicksale durchmacht, als wären wir nicht zugegen, ändert die untersuchten Objekte und die Vorgänge an ihnen nicht merklich, und so bleibt es auch, wenn wir Gründe haben, die Strahlung durch Hilfsapparate wie das Mikroskop unterwegs zu modifizieren.

Hat das Objekt selbst keine optischen Eigenschaften oder ändert es sie nicht unter dem Einfluß des betreffenden Geschehens oder Zustandes, dann fällt diese einfachste Methode fort, und so wird sie unbrauchbar, wenn es sich um die Untersuchung einer Eigenstruktur auf ihrem Leiter oder um ihn handelt; das elektrostatische Gebilde hat keine optischen Eigenschaften. — Diese Schwierigkeit ist ja in der Physik nicht selten und pflegt ohne weiteres dadurch überwunden zu werden, daß ein zweites physikalisches System mit dem zu untersuchenden in geeigneter Weise verbunden wird, dieses auf jenes einwirkt und aus der optischen Modifikation des Hilfssystems die Eigenschaften des untersuchten Systems indirekt entnommen werden (Elektroskop, Elektrometer usw.). Voraussetzung bei diesem Verfahren ist, daß das jeweilige Hilfssystem das untersuchte Gebilde nicht merklich beeinflusse oder doch

wenigstens die Seite des geprüften Vorganges oder Zustandes nahezu unverändert lasse, auf welche es gerade ankommt. Tritt aber eine unvermeidliche Beeinflussung ein, so muß sie irgendwie im voraus bekannt oder besonders festzustellen sein, damit man sie der Beobachtung anrechnen kann. Ein Elektrometer z. B., mit dem das Potential eines geladenen Leiters gemessen werden soll, muß eine Kapazität haben, die äußerst gering ist gegen die des Leiters, oder aber, ich muß die Kapazitäten beider kennen, um das wahre Potential des Leiters vor der Messung rechnend bestimmen zu können [1]). Es kommt vor, daß solche Korrekturen (und die „Theorie der Messung") viel langwieriger sind als die Messung selbst.

54. Mit derartigen Hilfssystemen die quantitativen Messungen und Registrierungen am untersuchten Objekt vorzunehmen, ist jedoch ein so geläufiges Verfahren, und der Nichtphysiker hört so wenig von den eben angedeuteten Schwierigkeiten der Forschungspraxis, daß sich die Meinung eingebürgert hat, physikalische Beobachtungen seien geradezu prinzipiell durch diesen Umstand charakterisiert: die Tatsache der Untersuchung habe keinerlei Einfluß auf die beobachteten Objekte, Zustände und Vorgänge. Dieser Satz ist dann von einiger Bedeutung geworden, als eine Erfahrungswissenschaft Psychologie sich entwickeln wollte, in welcher eine wesentliche Methode die unmittelbare phänomenologische Erlebnisfeststellung war. Denn in diesem Fall, so wandte man ein, ist ja das allererste Erfordernis aller zuverlässigen und überhaupt brauchbaren Beobachtung nicht erfüllt, sondern im schroffen Gegensatz zu den Methoden der Physik wirkt hier die Beobachtung selbst und schon die Absicht, sie auszuführen, sofort auf den Gegenstand der Untersuchung ein, weil beide, in einem Menschen vereinigt, einander funktionell sozusagen zu nahe sind, als daß es anders sein könnte. Daß der Einwand keine absolute Bedeutung besitzt, hat die bisherige Entwickelung der Psychologie gezeigt; wir lernen wohl allmählich noch besser, die hier wirklich vorhandenen Schwierigkeiten zu überwinden, sowie die Richtung planmäßig zu kontrollieren und zu lenken, in welcher die psychologische Beobachtung ihre Gegenstände beeinflußt. Damit aber sind wir prinzipiell auf dem gleichen Wege wie die Physik, wenn sie aus bekannten Eigenschaften ihrer Apparate und der untersuchten Objekte die Beeinflussung, welche oft genug auch bei ihren Methoden vorkommt, von vornherein in Rechnung zieht, in bestimmte kontrollierbare Bahnen lenkt und dadurch so gut wie unschädlich macht. Es besteht in dieser Hinsicht kein fundamentaler Gegensatz zwischen ihr und der Psychologie, sondern nur ein solcher des Grades.

[1]) Vgl. z. B. Maxwell, a. a. O. I, Kap. 13, besonders S. 339.

(Je genauer man diese Frage untersuchen wollte, desto deutlicher würde vermutlich das gleiche Ergebnis werden.)

Die Abhängigkeit der beobachteten Phänomene von der Beobachtung und also auch von allen Variationen des „inneren Verhaltens“ erreicht in der Psychologie ein Maximum auf dem Gebiet der emotionalen Zustände und Prozesse, ein zweites ist gegeben, wo ruhende oder dynamische Gestalten in hoher Ausbildung untersucht werden sollen. Mit jenem Gebiet haben wir hier nicht zu tun, für das zweite findet sich, daß in der Physik ganz gleichartige Untersuchungsschwierigkeiten auftreten, sobald wirklich starke physische Gestalten als solche zu erforschen sind, und die betreffenden Strukturen nicht einfach an einer äußeren Eigenschaft der Systeme abgelesen werden können [1]).

55. Wenn wir einem geladenen Leiter den Finger nähern, so verzerrt sich die Eigenstruktur von Feld und Ladung gerade wegen der Eigenschaften des Systems, die wir früher (37) als charakteristisch für die starke physikalische Gestalt angegeben haben. Freilich kommt der Finger als „Hilfssystem“ von vornherein nicht in Betracht. In der Physik wurden früher sogenannte „Sonden“ benutzt, kleine Leiter an langem isolierenden Griff, mit denen man den zu untersuchenden Leiter an einem Punkt nach dem anderen berührte, um eine der Dichte (dem Moment) an jedem Punkt ungefähr proportionale Ladung zu entnehmen und jedesmal elektrometrisch zu messen. Es leuchtet ein, daß man allmählich über den ganzen Leiter hin Proben entnehmen, immer wieder die Proben messen und so mit großer Mühsal ein angenähertes Bild davon erhalten kann, wie stark die Momente überall sind, und welche Eigenstruktur also eine Ladung auf dem betreffenden Leiter annimmt, aber nur, sofern der Vorgang des Sondierens nicht von Einfluß auf die sondierte Struktur ist. Da zwei Leiter eine Feld- und Ladungsstruktur haben, die nicht etwa das Nebeneinander ihrer Eigenstrukturen ist, so kann diese Forderung niemals wirklich ganz erfüllt werden: Die Sonde beginnt das Feld des untersuchten Leiters und also auch seine Ladungsstruktur zu verzerren, sobald sie in das Feld eingeführt wird. Um die Störung zu verringern, macht man die Sonde klein, aber die Struktur muß sich ändern, und so wird sie auch noch gefälscht sein in dem Augenblick, wo ein gewisser Anteil der Ladung auf die Sonde übergeht. Zwar kann man die Sonde auch noch äußerst flach wählen, so daß sie sich dem Oberflächenelement des Leiters

[1]) Es ist interessant, daß die schlechthin quantitativen Totaleigenschaften z. B. elektrostatischer Gestalten (Ladungsmenge, Potential) relativ leicht und genau zu bestimmen sind; erst bei dem Versuch einer „Analyse“ der Struktur wird diese notwendig verändert.

möglichst anschmiegt und also die physische Form gerade im kritischen Moment weniger verändert; aber in Wirklichkeit ist das eben wegen der von Ort zu Ort wechselnden Krümmung der Oberfläche nicht überall in gleicher Weise realisierbar, und man erhält notwendig fehlerhafte Bestimmungen. Vergleicht man die Mühe und Unsicherheit dieses primitiven Verfahrens mit der Eleganz und nachgerade fast wunderbaren Präzision von so vielen physikalischen Messungen, so wird man verstehen, daß dergleichen dem Physiker kaum noch als wirkliches Experimentieren erscheinen mag. „Die Methode der ebenen oder kugelförmigen Sonde kann keine zuverlässigen Resultate geben, zumal wenn man sie an Punkten anwendet, die auf Kanten, in Winkeln, auf vorspringenden Formteilen und Spitzen liegen; denn das Aufsetzen der Ebene oder Kugel an solchen Punkten verursacht eine beträchtliche Veränderung der Elektrizitätsdichte“ [1]).

56. Das Sondieren hat einige Ähnlichkeit mit dem Versuch, in psychologischer Beobachtung eine ruhende (z. B. optische) Gestalt nicht als ganze hinzunehmen, sondern analysierend zu untersuchen. Sollte der unbefangenen Gestaltwahrnehmung ein physisches Geschehen im Nervensystem entsprechen, welches selbst Gestalteigenschaften hätte [2]), so wäre das analysierende Beachten eines beschränkten Gebietes gewiß eine spezifische physische Änderung (oder besser: von einer solchen begleitet), und könnte deshalb im Prinzip die Gestalt nicht unbeeinflußt lassen, weder im beachteten Bereich noch außerhalb. Strukturmomente lassen sich im Nervensystem ebensowenig wie auf einer leitenden Oberfläche einfach als selbständige Teile behandeln [3]). — In einer Beziehung aber ist die psychologische Beobachtung von Gestalten viel besser gestellt als die physikalische Forschung im gleichen Fall: Wir können den typischen Charakter mancher anschaulichen Struktur als ganzer auf einmal erleben und von diesem Befund aus das Geschehen zu begreifen suchen, während diese vielleicht sehr adäquate Art, Eigenstrukturen zu erforschen, wenigstens im elektrostatischen Fall der Experimentalphysik zurzeit nicht möglich ist.

57. Aus der experimentellen Physik ist die Untersuchung elektrostatischer Gestalten wegen der geschilderten Schwierigkeiten so gut wie ganz verschwunden, und das war deshalb möglich, weil die wenigen technisch für den Physiker unentbehrlichen Strukturen des Gebietes auf andere Weise mit jeder beliebigen

[1]) Aus der „Physik“ von Chwolson, Bd. IV (S. 131 der französischen Ausgabe).

[2]) Weiter unten wird gezeigt, daß es stationäre Prozesse (nicht nur Ruhezustände) von Gestaltcharakter in der Physik gibt.

[3]) Vgl. Koffka, Zeitschr. f. Psychol. **73**, 58, 1915.

Genauigkeit, wenn schon oft nur mit einem großen Aufwand von geistiger Arbeit zu bestimmen sind, und weil es der Experimentalphysiker gern vermeidet, die ja rein physikalisch nicht besonders interessanten (und unzähligen) sonstigen Strukturen an seinem elektrostatischen Instrumentarium zu verwirklichen [1]). Die Strukturen werden, wie wir wissen, unmittelbar von der physischen Topographie ihres Raumgebietes bestimmt; man hat also nur in der Wahl der physischen Formen von Versuchsanordnungen vorsichtig zu sein, wo es sich um Elektrostatik handelt, so schiebt man zwar viele Gestaltprobleme sozusagen beiseite, aber man hat sich auch den Weg für andere Fragen damit geebnet, und wenn diese mehr interessieren als irgendwelche beliebigen Strukturen (so natürlicherweise in der Experimentalphysik), dann ist das ein durchaus berechtigtes Verfahren. Die Physik wäre nicht, wo sie heute ist, hätte sie anders gehandelt. Das zeigt deutlich genug die langsame Entwicklung von Wissenschaften wie den biologischen, die wesentlich mit physischen Gestalten zu tun haben, und also entweder deren Eigenschaften zu erforschen lernen oder aber an den eigentlichen Kern ihres Untersuchungsgebietes gar nicht herankommen.

Daß unbequeme Strukturwirkungen [2]) in der experimentellen Elektrostatik vermieden und die Strukturen selbst in ihr nicht mehr untersucht werden, ist wohl ein Grund dafür, daß die starken Gestalteigenschaften solcher Gebilde uns Nichtphysikern solange entgangen sind. Wir lernen etwas Experimentalphysik, kennen dagegen nicht mehr — wie einst unsere wissenschaftlichen Vorfahren in der Philosophie — auch die mathematische Physik; und da in jener die Strukturen nicht gerade als solche demonstriert, sondern eher nach Möglichkeit unschädlich gemacht werden, so fallen sie uns als eine durchaus positive Eigenschaft der Untersuchungsobjekte nicht auf.

Wie der Physiker störende Strukturwirkungen vermeidet, ist an und für sich nicht allein methodisch, sondern auch sachlich vom größten Interesse; denn es wird immer den vermiedenen Einfluß charakterisieren, was man mit Erfolg zu seiner Ausschaltung tut. Ich kann diese Seite der Angelegenheit nicht näher behandeln und empfehle nur, z. B. die Versuche mit der Drehwage (Verifikation des Coulombschen Gesetzes) daraufhin durchzudenken, wie viele maximal herabgedrückte Strukturwirkungen die eine Anordnung enthält. Jede der „Korrekturen", die an den Messungen vorzunehmen sind, verrät einen solchen Einfluß [3]). — Hierher gehört vor allem auch die Theorie des Faraday-Käfigs und ähnlicher „Schirme".

---

[1]) In vielen Untersuchungen, bei denen die Strukturen nicht als solche in Betracht kommen, sondern nur insofern sie für rein quantitative Daten bestimmend werden, fällt diese Rücksicht fort, weil eine einzige Größe, die Kapazität, dann alles Notwendige über Wirkung von Form und Maßstab des Leiters (auf das Potential) kurz angibt, und diese Größe sehr wohl experimentell zu ermitteln ist.

[2]) Vgl. über diese auch oben 45.

[3]) Das Studium von Lehrbüchern der Messungstechnik ist auch in dieser Hinsicht sehr aufklärend.

Fünftes Kapitel.

Verifikation an der theoretischen Methodik.

58. Die Bearbeitung von starken elektrostatischen Gestalten ist Sache der mathematischen Physik geworden, und seit Poisson, den man an den Anfang der Entwicklung stellen kann, ist wohl nicht auf viele theoretische Fragen ein solches Maß von Scharfsinn konzentriert worden wie auf diese und genau entsprechende außerhalb der Elektrostatik. Wäre jemand darauf verfallen, so hätte er geradezu das Problem: „Gibt es physikalische Gestalten?“ so angreifen können, daß er sich sagte: „Kommen derartige Gebilde in der Physik vor, so müssen sie nach den wesentlichen Eigenschaften von Gestalten, die wir bisher kennen, notwendig durch ganz besondere Schwierigkeiten der theoretisch-mathematischen Behandlung ausgezeichnet sein. Suchen wir also Gebiete der mathematischen Physik, in denen spezifische Denkschwierigkeiten auftreten, Gebiete, auf denen die gewöhnlichen mathematischen Methoden versagen, und sehen wir zu, ob die betreffenden Fragen nicht physische Gestalten zum Gegenstand haben!“ Denn es gibt wirklich solche Probleme, und zwar sind es genau diejenigen, von denen wir gerade sprechen, sowie verwandte, die wir später finden. Die theoretischen Methoden lassen den besonderen Charakter des Gebietes ebensogut oder noch deutlicher hervortreten als das unzureichende experimentelle Verfahren, welches soeben kurz behandelt wurde.

Aus gutem Grunde sehe ich jedoch davon ab, diese mathematischen Methoden hier im einzelnen zu besprechen. Geht man sie nämlich genau und an konkreten Beispielen durch, so ist man zunächst schlechterdings gezwungen, seine ganze Aufmerksamkeit den einzelnen Phasen und Schlüssen des schwierigen mathematischen Prozesses zuzuwenden, und verliert dabei um so sicherer die allgemeine naturphilosophische Fragestellung aus den Augen, je weniger man das Gebiet vorher gekannt hat. In diesem Zusammenhang kommt es vielmehr auf die Erkenntnis der prinzipiellen Züge und Schwierigkeiten des theoretischen Problems als auf die mannigfachen Lösungsversuche und Lösungen an, welche allerdings als Gegenstand der speziellen logischen Methodenlehre von dem höchsten Interesse sind.

59. Wenn man die Forschungsmittel des Menschen nicht alle als selbstverständlich hinnehmen will, sondern manche von ihnen als wunderbare und selbst sehr untersuchenswerte Gebilde zu sehen gelernt hat, so kommt man aus einer Art Verwunderung gar nicht heraus, wo es sich um die theoretische Untersuchung physikalischer

Gestalten handelt. Und ein hinreichender Grund zu solchem Erstaunen liegt bereits in der Tatsache, daß es scharfe, zum Ziel führende mathematische Methoden auf diesem Gebiete überhaupt gibt, obwohl eine befriedigende empirische Erforschung der gleichen Gegenstände weder bisher erfolgt ist, noch mit vorhandenen Mitteln erfolgen kann. Man darf nicht etwa denken, das werde durch gewisse Hypothesen ermöglicht, welche die theoretische Behandlung der betreffenden physischen Sachverhalte kurzweg zugrunde lege und, soweit nachher eine Prüfung möglich ist, auch rein praktisch durch Erfolg bestätigt finde. Ganz im Gegenteil ist kaum ein Gebiet der theoretischen Physik so arm an hypothetischen Voraussetzungen wie gerade die mathematische Bestimmung z. B. elektrostatischer Strukturen: Ob man eine dualistische oder unitarische Elektrizitätslehre annimmt, ob man Elektrizitätsmengen als Kontinua oder als Elektronenvielheiten ansieht, ob man dem elektrostatischen Feld Realität beimißt oder nicht, das ist für die theoretische Bestimmung der physischen Eigenstruktur nahezu gleichgültig; denn alle diese Fragen betreffen in erster Linie die Natur des „Materials", welches in Gestalt auftritt, aber weder diese selbst noch die allgemeinen Gesetze, denen das gestaltete Material unterworfen ist. Diese liegen fest, und es kann, welches immer die endgültige Theorie des elektrischen Materials (der Ladungen, des Feldes) sein mag, gar keine Rede davon sein, daß die allgemeinen Strukturbedingungen von dergleichen in Zukunft noch wesentlich beeinflußt werden würden. So hielt Maxwell die elektrischen Ladungen als eine Art imponderabler Substanzen für eine Fiktion, aber seine Darstellung der elektrostatischen Strukturprobleme (Bd. I, Kap. 8 bis 12) kann ohne weiteres ältere Rechnungen übernehmen, da die veränderte Materialhypothese solche frühere Bestimmungen nicht etwa als fehlerhaft ansieht, sondern nur sozusagen auf die Felder überträgt und hier ihre wahre Bedeutung sucht. Man wird je nach der Materialannahme, die man macht, das Cavendish-Coulombsche Gesetz oder aber die Laplacesche Differentialgleichung (vgl. oben 47) zum Ausgangspunkt der theoretischen Gestaltbestimmung wählen wollen, aber wenn eine bestimmte physische Form vorliegt, deren Eigenfunktion gefunden werden soll, so ist es allein eine Frage des Geschmacks oder auch der mathematischen Technik (im engeren Sinn), ob man so oder so verfährt: das Ergebnis wird ein und dasselbe in beiden Fällen und folgt, wenn die Lösung überhaupt gelingt, aus der gegebenen physischen Form und einer jener beiden allgemeinen Bedingungen mit Notwendigkeit. Die Struktur auf einem Leiter und in seiner Umgebung (Feld) macht also fast den Eindruck eines „a priori" zu bestimmenden Gebildes, und es ist

allein ein Satz wie: „Eine ruhende Elektrizitätsmenge erzeugt um sich ein elektrostatisches Feld der Form $\frac{\eta}{r^2}$“, der als Erfahrungsgrundlage bei der Berechnung dient. Dieser Satz aber (oder als Äquivalent die Differentialgleichung) ist innerhalb der möglichen Meßgenauigkeit unantastbar [1]). Mit einem solchen Minimum von Empirie lassen sich also prinzipiell die mannigfaltigsten Gebilde mathematisch scharf bestimmen, welche ihren kräftigen Realitätscharakter bei jedem Versuch der experimentellen Prüfung so deutlich und praktisch unliebsam bemerklich machen.

In der Erkenntnistheorie und Logik ist gegenwärtig viel von „Wesensgesetzen“ die Rede, welche bei Betrachtung gewisser Denkgegenstände nicht als empirische Regeln, sondern als eine Art innerer Notwendigkeiten des betreffenden Denkmaterials erfaßt werden. Angenommen, die Natur habe gewisse Gesetze, die auch aus dem Wesen der betreffenden Naturgebilde folgen — und was für Gesetze sonst sollen die inneren Grundeigenschaften der Natur wiedergeben? —, ist es dann angebracht, immer wieder alles, was wir von der Natur „wissen“, in Bausch und Bogen bloße „vérités de fait“ zu nennen und unter diesem Namen in philosophischer Hinsicht ein wenig gering zu schätzen? Noch wenn, formal betrachtet, wir zunächst nur solche Regelmäßigkeiten durch Induktion erkennen, — sollte es, falls eine von uns unabhängige Natur besteht, gar keinen merklichen Unterschied machen, ob wir mit den gefundenen „Tatsachenregeln“ einem Wesensgesetz der Natur nahekommen oder wirklich nur einen empirischen Befund wiedergeben, der sachlich auch beliebig anders hätte ausfallen können? —

Zu gleicher Zeit wird man es auffällig finden, daß gerade die physischen Strukturen oder Gestalten diesen quasiapriorischen Charakter zeigen, oder besser: daß gerade sie, einerlei für welche physische Form, aus einem einzigen Erfahrungssatz mit einer gewissen Denknotwendigkeit abzuleiten sind. Denn diese Erscheinung kehrt mit geringen Varianten bei allen bisher untersuchten Arten von physikalischen Gestalten wieder, und zwar ebenfalls überall verbunden mit der anderen, daß Materialhypothesen, also die Mehrzahl aller physikalischen Hilfsannahmen, für die Gestaltprobleme ohne entscheidende Bedeutung bleiben. Kein Teil der

[1]) Sollte statt der Potenz 2 im Grundgesetz eine andere einzusetzen sein, so ist sie ganz ohne Zweifel von 2 nur um einen winzigen Betrag verschieden (Maxwell). Strukturbestimmungen, die auf jenes Gesetz gegründet sind, würden ebenfalls einer minimalen quantitativen Korrektur bedürfen, wenn die Potenz in der soundsovielten Dezimale geändert werden müßte.

mathematischen Physik ist so schwer, aber auch keiner, wenn überhaupt, so schlüssig und endgültig zu behandeln wie das Gebiet der Eigenstrukturen [1]).

60. Die merkwürdige Eigenschaft der physikalischen Gestalten, unzweifelhaft so real zu sein wie irgend etwas Physisches und doch, von einem sehr allgemeinen der Erfahrung entstammenden Gesetz aus, im übrigen rein theoretisch bestimmbar zu sein, macht sich schon in Fällen geltend, wo elektrostatische Strukturen von einem Schulkind angegeben werden können, wenn man ihm die betreffenden physischen Formen vorlegt. Sobald feststeht, daß ein Leiter bei Ladungsgleichgewicht nur an der Oberfläche freie Ladungen trägt — das ist nur eine andere Form des Coulombschen Satzes —, sobald ferner gesichert ist, daß der umgebende Isolator in allen Richtungen homogen bleibt, kann man für den Fall der Kugel als Leiterform keine andere Eigenstruktur finden, als die einer gleichmäßig über die Kugelfläche ausgebreiteten Ladungsschicht, eines Potentials, das auf konzentrischen Kugelschalen um die Kugel herum konstante Werte hat, und eines Feldes, das in ringsum symmetrischer Ausbreitung überall auf den Kugelschalen senkrecht steht. Es gibt noch einige derartig „leichte Fälle"; sie sind bekannt genug; aber was bedeutet es, daß wir sie ohne weiteres und mit dem Eindruck, nur das Wesen der Sache zu erfassen, so einfach „erschließen" können? Und das, obwohl niemand von uns eine elektrische Eigenstruktur dieser Art je hat wahrnehmen können, und die meisten (die doch das Ergebnis auch als notwendig verstehen werden) über keinerlei elektrostatische Erfahrungen überhaupt verfügen.

Dieser letztere Umstand läßt gewisse Betrachtungen als unzureichend erscheinen, welche Mach in seiner „Mechanik" gelegentlich verwandter Probleme aus der mechanischen Statik anstellt. Manche Erkenntnisse auf diesem Gebiet, die ebenfalls und im gleichen Sinn einen „quasiapriorischen" Eindruck machen, nennt er „instinktiv" und scheint sie für Produkte einer unvermerkten Erfahrung (Assoziationen) zu halten, zu einem Teil, nämlich soweit es sich dabei um Formen mit zweiseitiger Symmetrie (Hebel) handelt, führt er sie auf die Symmetrie unseres Körpers zurück [2]). Im Fall der einfachsten elektrostatischen Probleme, wie des eben angeführten, ist aber eine Begründung des „instinktiven Wissens" weder durch unvermerkte Erfahrung (die ja hier niemand hat) noch durch die Symmetrie unseres Körpers möglich (der ja nicht symmetrisch wie eine Kugel ist), und doch wird jedermann sofort sagen, daß jenes merkwürdig unmittelbare Erkennen in der mechanischen Statik, vielleicht unter Mitwirkung von allerhand Erfahrung und von Körpersymmetrie, den wesentlichen Grundzug mit dem quasiapriorischen Lösen der elektrostatischen Aufgabe gemein hat. Also muß der letzte Ursprung etwas tiefer liegen.

[1]) Vgl. hierzu die Bemerkung bei Chwolson, a. a. O. IV, S. 128 (der franz. Ausgabe).

[2]) Französische Ausgabe S. 10, 18, 20, 32 f.

61. Fälle wie dieser und der Inhalt der beiden letzten Paragraphen überhaupt scheinen zunächst im Widerspruch zu stehen mit der Behauptung, Gestaltprobleme seien durch eine besondere Schwierigkeit für das theoretisch-mathematische Denken ausgezeichnet. Denn was kann einfacher sein als diese Art, in schlichter Anschauung des gegebenen Problems sozusagen mit einem Blick die Eigenstruktur ganz und gar zu erfassen oder zu bestimmen? Aber diese Selbstverständlichkeit ist eben nur vorhanden, solange es sich um allereinfachste und stark symmetrische physische Formen handelt, bei denen die Struktur wie eine physisch-lebendige Kopie oder homogene Ausfüllung gegebener Formen wirkt. Und gerade in dem Umstand, daß für den einfachen Fall die Lösung „mit einem Blick als ganze" gefunden wird, liegt schon versteckt, was die ungemeine Schwierigkeit des Problems in auch nur wenig komplizierteren Aufgaben ausmacht, daß nämlich auch hier die Aufgabe als ganze auf einmal gelöst werden muß. Bereits für physische Formen, die der Kugel noch recht nahe zu stehen scheinen, ist die scharfe Bestimmung der Eigenfunktionen nur den größten Meistern der Mathematik und mathematischen Physik gelungen.

Man darf das nicht so mißverstehen, als ginge bei der Behandlung etwas schwierigerer Probleme des Gebietes das „Quasiapriorische" der Erkenntnisart verloren, als reichte das Minimum von Erfahrung (Cavendish-Coulomb) da nicht mehr aus zu einer übrigens rein theoretischen Bestimmung der realen Struktur auf beliebigen Leiterformen und um sie. Im Gegenteil besagt eine relativ früh gewonnene und gesicherte Erkenntnis, daß bei gegebener Form das Problem stets eine und nur eine Lösung haben kann, welche vollständig bestimmt ist durch das Grundgesetz (oder die Differentialgleichung $\Delta V = 0$) in jedem, und außerdem durch die physische Topographie (Form) im einzelnen Fall. Der Zusammenhang zwischen diesen Daten und der Lösung ist also stets von der Art, die man „denknotwendig" nennt, und dabei können wir uns jeder Theorie dieser Denknotwendigkeit enthalten, indem wir einfach auf den Charakter strenger mathematischer Beweise hinzeigen: In demselben Sinn, wie da der Zusammenhang von Prämissen und Folgerung als zwingend gilt, in derselben Bedeutung ist die Eigenfunktion notwendig bestimmt durch die beiden angegebenen Voraussetzungen, und so wird es kaum jemand heutzutage einfallen, das Resultat einer derartigen Bestimmung so lange anzuzweifeln, als die (unzuverlässige) experimentelle Prüfung aussteht[1]).

[1]) Dagegen wäre es freilich sehr erwünscht, wenn eine zuverlässige und einfache experimentelle Methode gefunden werden könnte.

Mit der Erkenntnis, daß ein denknotwendiger Zusammenhang zwischen den vorausgegebenen Bedingungen einer Aufgabe und ihrer Lösung besteht, ist nicht zugleich diese Lösung selbst für alle Fälle gewonnen, sonst wäre es leicht, die Mathematik zu fördern. So können jene allgemeine Erkenntnis und vollkommene Ratlosigkeit, wie ein beliebiger Einzelfall wirklich zu behandeln sein möchte, sehr wohl zu gleicher Zeit bestehen, und haben lange genug nebeneinander bestanden. So kann ferner eine gefundene Lösungsmethode kompliziert und für den Ungeübten schwer verständlich und doch zugleich eine Abfolge „denknotwendiger" Schlüsse sein.

Unsere Aufgabe ist jedoch nicht, eine Untersuchung darüber, inwiefern physische Strukturen von so wenig Erfahrung aus so streng bestimmbar sein können. Nachdem vielmehr zur Sicherung unseres wesentlichen Gedankenganges und zur Vermeidung von Mißverständnissen gezeigt ist, daß die Realität der physischen Gestalten und ihre Beschaffenheit in jedem Fall durchaus keine Angelegenheiten darstellen, die von irgendwelchen kühnen physikalischen „Hypothesen" abhingen und deshalb mit solchen Annahmen zugleich angegriffen werden könnten, kehren wir zurück zur Hauptfrage.

62. Wie das mathematische Problem der Eigenfunktionen gerade die Gestalteigenschaften der gesuchten physischen Gebilde verrät, läßt sich auf elektrostatischem Gebiet leicht demonstrieren. Denn bei einer Fragestellung kann hier die Antwort oder wenigstens der allgemeine Charakter der Antwort mit den bekannten Verfahren der Infinitesimalrechnung ohne weiteres angegeben werden, während sozusagen hart daneben, auf gleichem Gebiet, aber für eine andere Fragestellung, das Versagen der üblichen Rechnungsarten sofort als notwendig zu erkennen ist.

Versuchen wir, die folgenden vier Aufgaben zu lösen:

a) Gegeben ist ein Leiter bestimmter Form (Oberfläche S) im leeren oder lufterfüllten Raum, sowie die Dichte der ruhenden elektrischen Ladung an jedem Punkt der Oberfläche (Funktion σ). Es soll für jeden Punkt des Feldes das Potential, die resultierende Feldstärke und die Energie (für die Raumeinheit berechnet) als Funktion der Lage des Punktes bestimmt werden. Die Lösungen sind:

$$V = \iint \frac{\sigma\, dS}{r}, \quad \mathfrak{E} = \sqrt{\left(\frac{\partial V}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial z}\right)^2}, \quad W = \frac{1}{8\pi}\mathfrak{E}^2.$$

(Mit W ist die Energiedichte bezeichnet, im übrigen haben die Zeichen gleiche Bedeutung wie früher.)

Die auszuführenden Operationen sind also Integrationen über Flächen und Bildung von Differentialquotienten. An ihnen ist

nichts, was dem Mathematiker besondere oder prinzipielle Schwierigkeiten bereitete. Es kann vorkommen, daß eine der erforderlichen Integrationen nicht leicht auszuführen ist, aber die gedankliche Aufgabe, nämlich eine Summierung, ist klar vorgezeichnet, und wo das Integral sich nicht in geschlossener Form angeben läßt, da wird im allgemeinen eine Näherungsmethode zum Ziele führen und die gesuchten Werte mit der gewünschten Genauigkeit liefern.

Man tut gut, zwischen mathematischen Schwierigkeiten im engeren Sinn und eigentlichen methodischen Schwierigkeiten für die mathematische Behandlung zu unterscheiden. Jene können auch bei einer geläufigen Rechnungsart auftreten, z. B. in der Form „unbestimmter Werte“ usw. Dergleichen ist beim Auswerten bestimmter Integrale gewiß häufig; aber hier ist der Sinn der auszuführenden Operation doch nicht zweifelhaft. — Anders bei den prinzipiellen methodischen Sshwierigkeiten, wo sich zunächst zwischen dem Problem und den geläufigen Verfahren der Analysis gar kein Kontakt ergibt. Die Aufgabe a) kann höchstens zu Schwierigkeiten der ersten Art führen.

b) Gegeben ist das Potential V als harmonische Punktfunktion um einen Leiter. Es ist zu bestimmen, welche Ladung σ sich auf jedem Punkt seiner Oberfläche findet. Die Lösung ist:

$$\sigma = -\frac{1}{4\pi}\frac{\partial V}{\partial n},$$

wo der Wert des Differentialquotienten der bekannten Funktion V an der Oberfläche des Leiters und in Richtung der äußeren Normalen bestimmt werden soll. Die Operation ist als Bildung einer Derivierten in der Regel ohne weiteres ausführbar.

c) Gegeben ist die Form des Leiters im homogenen Dielektrikum und das Gesetz von Coulomb. Es soll die Ladung an jedem Punkt der Oberfläche für den Fall der Ruhe bestimmt werden, also alle Momente derart, daß sie im ganzen einander tragen.

d) Gegeben ist die Form des Leiters im homogenen Dielektrikum und als Bedingung der Ruhestruktur im Felde die partielle Differentialgleichung $\Delta V = 0$. Die Feld- und Energiestruktur ist durch eine Funktion V zu charakterisieren, welche eine Lösung der Differentialgleichung darstellt und für den ganzen Leiter (innerhalb seiner Oberfläche) eine Konstante wird.

Man sieht sofort, daß c) und d) zwei Aufgaben sind, welche, einander äquivalent, ein und dasselbe Gestaltproblem dort für die Ladungsstruktur, hier für das zugehörige Feld aufwerfen. In der Tat zeigt ja die leichte Lösung von Aufgabe b), wie man von der Lösung für d), d. h. von bekanntem V, zu einer solchen von c), also zur Ladungsstruktur, gelangt, und umgekehrt die Lösung von a), wie man mit geläufigen Methoden zu d) übergeht, wenn erst einmal c) gelöst ist. Im ganzen ergibt sich also nur eine Zweiteilung von prinzipiell verschiedenen Problemen:

I. Man hat die Eigenstruktur für eine gegebene Form zu suchen und kann das an der Ladung (Coulombsches Gesetz) oder auch am Felde ausführen ($\Delta V = 0$), je nachdem ob man gemäß c) oder d) vorgeht.

II. Man hat bei gegebener Eigenstruktur, je nachdem von welcher der beiden Seiten (Ladung oder Feld) her sie bekannt ist, die zweite Seite explizite auszudrücken, die implizite von der anderen gegebenen schon mitbestimmt wird [a) oder b)].

Daß die Aufgaben a) und b) auf einfache Integration oder Differentiation hinauslaufen, besagt also nichts anderes, als daß es sich um eine einzige Eigenstruktur handelt, in welcher mathematisch alles aufs einfachste und unter verschiedenen Gesichtspunkten bestimmbar ist, immer vorausgesetzt, daß sie selbst von einer ihrer beiden Seiten bekannt ist. In einer vorliegenden (bekannten) Struktur zu rechnen, ist nicht sehr schwer. Aber wie erwirbt man die Kenntnis der Struktur selbst?

63. Was die erste Seite [c)] dieses eigentlichen Strukturproblems betrifft, so hat man zunächst bei dem Versuch, die Ruheausbreitung der Ladung zu finden, das merkwürdige Gefühl, als entgleite einem dabei fortwährend das Untersuchungsobjekt. Ist man z. B. gründlich daran gewöhnt, stets von „Teilen“ auszugehen, und den Weg als allein naturwissenschaftlich anzusehen, bei dem ein solcher „Teil“ nach dem anderen berücksichtigt wird [und hinterdrein etwa noch die „Verhältnisse“ zwischen ihnen[1])], so muß man eine arge Enttäuschung erleben, wenn es sich darum handelt, eine Ladungsstruktur theoretisch zu bestimmen. Es ist der Sache nach vollständig unmöglich, erst die Dichte an einer Stelle, dann an einer zweiten usw. zu berechnen, da ja bei einem gegebenen Gesamtladungsbetrag des ganzen Leiters die Ladung an einer einzigen Stelle schon von der an allen übrigen getragen werden soll, und deshalb von ihnen allen und von der Form des ganzen Leiters durchweg real abhängt, also auch theoretisch nicht ohne Rücksicht auf sie gefunden werden kann. Weil aber für die Momente an den übrigen Stellen ganz dasselbe gilt, sie auch noch unbekannt sind und der Oberflächenpunkte auf dem Leiter so viel zu unterscheiden sind, wie man will, so kommt jener charakteristische Eindruck zustande, als könne man mit dem Problem keinen Kontakt gewinnen; es läßt sich nicht „wenigstens erst an einer Stelle angreifen“.

Vielleicht tut man gut, sich diesen Eindruck, auch wenn man die wirklich zum Ziel führenden Lösungsmethoden in einzelnen Fällen schon kennt, dadurch recht lebhaft zu machen, daß man

[1]) Vgl. die Äußerung Maxwells § 49.

mehrmals von neuem versucht, mit der Struktur gewissermaßen „handgemein zu werden“ und mit ihrer Behandlung an irgendeinem ihrer Momente nach geläufigen mathematischen und Denkmethoden zu beginnen. Meiner Erfahrung nach gibt es nichts, was den Charakter nicht nur der theoretischen Aufgabe, sondern ebenso der Gestalt selbst so stark fühlbar machte, wie dieses unvermeidliche „Abgleiten“ am Problem bei dem Bemühen, es ähnlich zu behandeln, wie es jedermann an Summen und summativen Verteilungen zu tun gewohnt ist.

64. Daraus also scheint zu folgen, daß man eine solche Aufgabe entweder für die gesuchte Ladungsstruktur als ganze auf einmal oder aber überhaupt nicht angreifen und lösen kann. So ist es in der Tat, und die ganze Schwierigkeit, auf die das Denken des Menschen, an solche Probleme sonst wenig gewöhnt, in diesem Gebiete stößt, geht aus der einen Problemeigenschaft und ihren notwendigen Folgen hervor. Zugleich erkennen wir, daß der charakteristische Zug der Denkaufgabe nur einfach die wesentliche Charakteristik ihres physischen Gegenstandes wiedergibt, man möchte sagen abbildet, insofern die Struktur selbst durchaus nicht wie ein summatives Zusammen beschaffen ist. — Ebenso entsprechen den bemerkenswerten Sekundäreigenschaften der physischen Struktur homologe Eigenschaften des mathematischen Problems. Wie wir z. B. sagten, daß die Struktur für zwei benachbarte Formen durchaus nicht das Nebeneinander (im Feld das Übereinander) der beiden Eigenstrukturen sei, sondern im allgemeinen eine ganz verschobene Gesamtstruktur an deren Stelle trete, so finden wir hier, daß die mathematische Aufgabe in einem solchen Fall vollkommen neue Schwierigkeiten enthält. Nichts ist leichter zu bestimmen als die Eigenstruktur für eine Kugel (vgl. oben 60). Sind aber zwei Kugeln einander benachbart, so ergibt sich ein Problem, dem Poisson „höchst mächtige und faszinierende Arbeiten“ widmen konnte[1]), und welches dann doch noch über zwölf hervorragende Mathematiker und Physiker bis in die neueste Zeit einer weiteren Behandlung für würdig hielten[2]). Niemand, der diese Teile der mathematischen Physik näher kennen gelernt hat, wird jemals wieder behaupten, alle physikalischen Gebilde hätten rein summativen Charakter.

65. Von solchen Eigenschaften des Problems ist es nun auch bedingt, daß die älteren Methoden zur Bestimmung der Ladungsstrukturen, so scharfsinnig sie auch sind, einen methodologisch etwas unbefriedigenden Eindruck machen. Sie gehen alle darauf

[1]) So J. J. Thomson in der dritten Auflage des Maxwellschen Hauptwerkes S. 281.

[2]) Chwolson, a. a. O. IV, S. 158.

aus, wenigstens in bestimmten Einzelfällen zum Ziel zu gelangen, wo die Leiterformen geometrisch sehr übersichtlichen Bau haben und deshalb mannigfache geometrische Relationen an ihnen im voraus bekannt sind. Mit Hilfe dieser gelingt es dann, das Gestaltproblem auf allereinfachste Formen (wie etwa die Struktur des Feldes um Punkte) zurückzuführen und so indirekt zu lösen. Man bekommt also mit Hilfe der Kelvinschen Methode der „elektrischen Bilder" z. B. unzweifelhaft streng gültige Ergebnisse, aber methodologisch gewissermaßen zufällig dadurch, daß einige noch sehr regelmäßige Leiterformen vermöge ihrer elementaren geometrischen Eigenschaften derartige Problemreduzierungen erlauben, und eben auch nur für diese Formen.

Ähnlich steht es mit dem Aufsuchen der sogenannten Greenschen Funktion, die in wenigen geometrisch einfachen Fällen bekannt ist, und deren Feststellung im Grunde auf fast das gleiche Problem hinführt, welches mit ihrer Hilfe gelöst werden soll[1]). — Die Möglichkeit, Strukturprobleme bisweilen auf andere und bequemere zu reduzieren, hängt mit einer Eigenschaft der Strukturen zusammen, von der weiterhin noch die Rede ist. Es gibt ganze Familien und Serien nach einem Gesetz verwandter elektrostatischer Gestalten.

Der Nichtmathematiker kann an folgendem Beispiel aus anderem Gebiet ersehen, worin die Beschränktheit solcher Methoden liegt: Wenn es sich darum handelt, die Funktion $\sin x$ für bestimmte Werte der Variablen x zu ermitteln, so erlauben schon geringe geometrische Kenntnisse, den gesuchten Wert für ausgezeichnete Winkel wie 30^0, 45^0, 60^0 unmittelbar auszurechnen. Aber das ist noch keine allgemeine Methode, $\sin x$ für beliebige Winkel zu finden.

Ganz andere und viel weiter führende Bahnen wurden erst eingeschlagen seit den 70er Jahren des vorigen Jahrhunderts, und man kann in den verschiedenen Lösungsversuchen, die von C. Neumann an gemacht wurden, eine intensive Bemühung erkennen, aus dem etwas Engen und Speziellen der älteren Forschungswege heraus und zu viel allgemeineren Methoden zu kommen (vgl. außer der Neumannschen die Methode „de balayage" von H. Poincaré). Wie ein endgültiger Fortschritt zur umfassenden Lösung dieses und anderer nahe verwandter Probleme wirkt aber erst die Fredholmsche Entdeckung von 1900. Die Theorie der Integralgleichungen gibt einen prinzipiellen Operationsweg zur Bestimmung physischer Gestalten an, und vom Standpunkt der Gestalttheorie wird man geneigt sein, in dieser mathematischen Leistung und in denjenigen, die sich unmittelbar an sie anschlossen, eine ganz entscheidende Bereicherung der menschlichen Denktechnik zu sehen. Der Grundgedanke, welcher anscheinend zu der neuen Methode führte, ist für das Wesen der Strukturfrage so charakteristisch, daß wenigstens von ihm später noch die Rede sein soll.

[1]) Goursat, Cours d'Analyse Mathématique (2. Aufl.) III, S. 219 u. 270f.

66. Die beiden Fragestellungen — nach der Ladungsausbreitung und nach der Feldstruktur — sind nicht immer streng geschieden, wo in einer der älteren Methoden ein Gestaltproblem gelöst wird. Es handelte sich früher zunächst darum, nur überhaupt einen Weg zum Ziel zu finden, und deshalb ging man in den oft etwas verwickelten Schlußverfahren je nach Bedarf vom Feld zur Ladung und umgekehrt über. Aber die Frage d) in 62, welche Lösungen der Laplaceschen Differentialgleichung unter jedesmal speziellen Raumbedingungen verlangt, hat eine viel allgemeinere physikalische Bedeutung als die rein elektrostatische. Auch wo es physikalisch nichts den Ladungen recht Analoges gibt, trifft man auf dasselbe Problem, und deshalb sind die Schwierigkeiten der Lösung bei dieser Fragestellung einem weit größeren Gebiet der mathematischen Physik eigentümlich. Aus diesem Grunde wird eine nähere Betrachtung der Frage d) nötig.

Im Verlauf der mathematischen Ausbildung ist man nicht wenig überrascht, wenn man zum ersten Male von den Eigenschaften der partiellen Differentialgleichungen hört, und andrerseits kann die stets imponierende Macht der theoretisch-naturwissenschaftlichen Methodik an wenigen Stellen so schlechthin zur Bewunderung zwingen wie dort, wo man gewisse dieser Differentialgleichungen, z. B. nach dem Verfahren Fouriers, lösen lernt. Aber ehe man so weit gelangt, hat man freilich auch die Enttäuschung darüber zu verwinden, daß die Infinitesimalrechnung, welche einem zuvor wie ein Schlüssel zu allen Türen vorkam, an den Kern der Aufgabe nicht heranreicht, welche in einer partiellen Differentialgleichung mit vorgeschriebenen Grenz- oder Randbedingungen vorgelegt wird.

Das hier zu behandelnde Beispiel einer solchen Gleichung ($\Delta V = 0$) zeigt ohne weiteres, weshalb die Aufgabe eine etwas andere sein muß als bei gewöhnlichen Differentialgleichungen. Alle elektrostatischen Felder in der Umgebung beliebig geformter Leiter genügen dieser einen Gleichung; also kann das Wesentliche für die konkrete Lösung im Einzelfall nicht so sehr in dieser Gleichung liegen, diese an und für sich muß vielmehr unendlich viele Lösungen haben können, sondern die Grenzbedingungen, die Formen, an denen das Potential konstant wird, sind das im spezifischen Sinn Maßgebende, für welches ein „passendes“ Feld zu finden ist. So wird die Differentialgleichung selbst zur allgemeinen formalen Bedingung, welcher die Lösung dieser Strukturaufgabe in allen Fällen genügen soll. Eben darin liegt ja die große Überraschung des Lernenden, der von gewöhnlichen zu partiellen Differentialgleichungen fortschreiten möchte: daß die Funktion, welche zu suchen ist, durch eine solche Gleichung allein noch gar nicht bestimmt wird, sondern nur erst eine unübersehbare Mannigfaltigkeit

von Funktionen, welche man im vorliegenden Fall ($\Delta V = 0$) die harmonischen nennt.

Es versteht sich nach allem Bisherigen von selbst, daß bei dem Feldproblem genau dieselben Schwierigkeiten auftreten müssen, wie bei der Behandlung der Ladungsstruktur auf dem Leiter; und wirklich zeigt sich auch hier wieder, daß die Aufgabe entweder für das ganze Feld oder überhaupt nicht gelöst werden kann. Die Potentialfunktion ihrem allgemeinen Ausdruck nach muß gefunden werden, wenn man erreichen will, was verlangt wird, daß nämlich eine Fläche konstanten Potentials mit der Oberfläche des Leiters zusammenfällt. Auch dieses Problem bildet durch seine spezifische Schwierigkeit die wesentliche Eigenschaft der zu untersuchenden physischen Gestalt ab.

67. Maxwell, für den das elektrostatische Problem im Felde lokalisiert war, mußte als den physikalisch vollkommen adäquaten Ausdruck der Aufgabe die Differentialgleichung mit gegebenen Grenzbedingungen ansehen, da eben sie sich auf das Feld bezieht. In der Tat wird ihr diese Bedeutung beigemessen[1]). Aber dazu heißt es sogleich: „Es ist im allgemeinen nicht möglich, mittels bekannter mathematischer Methoden diese Gleichung so zu lösen, daß sie willkürlich gegebenen Bedingungen genügt“[2]), und dann folgt eine etwas resignierte Besprechung des indirekten Erkenntnisweges, auf dem man sich in Einzelfällen helfen kann. Der Weg könnte nicht viel charakteristischer für das Problem sein.

Partielle Differentialgleichungen so einfacher Form wie die vorliegende lassen den Mathematiker ganze Serien von möglichen Lösungen erkennen, welche alle gleich viel wert sind, solange keine Grenzbedingungen vorgeschrieben werden[3]). Faßt man irgendeine beliebige dieser Lösungen als Potentialfunktion auf oder in unserem Fall speziell als den Ausdruck eines elektrostatischen Feldes, so sind die Flächen $V =$ const. Niveauflächen dieses Feldes. Eine Leiteroberfläche, die mit einer dieser Niveauflächen zusammenfällt, ist also auf konstantem Potential; wollen wir (im Sinn der vor-Maxwellschen und der Elektronentheorie) eine zugehörige Ladungsstruktur bestimmen, so geschieht das ohne weiteres nach 62, Aufgabe b); der Leiter ist, wie man leicht sieht, durchweg auf demselben Potential, und wir haben die Aufgabe gelöst, nicht etwa zu der physischen Form die zugehörige Eigenfunktion, sondern umgekehrt zu einer beliebig gewählten

---

[1]) A. a. O. I, S. 124.

[2]) A. a. O. I, S. 177.

[3]) Vgl. z. B. Goursat, Cours d'Analyse Mathématique (2. Aufl.) III, S. 96ff., 242ff.

elektrostatischen Struktur eine passende physische Form, einen Leiter zu finden. Wendet man dasselbe Verfahren vielfach an, geht immer wieder von neuen Strukturausdrücken für Felder aus und sucht sich so immer mehr hinzupassende Leiterformen, so kann mau allmählich eine schöne Sammlung von Strukturen und entsprechenden physischen Formen wie ein Wörterbuch anlegen und späterhin, wenn einmal das Gestaltproblem für eine vorgeschriebene Form aufgeworfen wird, die zugehörige Eigenstruktur bequem nachschlagen, vorausgesetzt natürlich, daß umgekehrt die betreffende Leiterform schon einmal zufällig bei der Anlage des Verzeichnisses aufgetreten war. Das ist es, was Maxwell die „historische Kenntnis“ von Lösungen nennt, und er geht so weit, zu behaupten, daß „jedes elektrische Problem[1]), dessen Lösung wir kennen, mit Hilfe dieses umgekehrten Verfahrens behandelt worden ist“ [2]), d. h. daß frühere mathematische Erfahrungen über einfache Feldstrukturen und die in ihnen auftretenden Äquipotentialflächen alle diejenigen Forscher zum Ziel brachten, welche umgekehrt bei gegebener Leiterform die elektrostatische Gestalt wirklich bestimmen konnten. — Dann schreibt der größte Theoretiker, den die Elektrizitätslehre bisher fand, die folgenden Sätze: „Sollen wir ein Instrument ersinnen, um elektrische Messungen mit der größten Genauigkeit auszuführen, so können wir für die elektrisierten Oberflächen jene Formen wählen, welche Fällen mit genau bekannter Lösung entsprechen[3]). Sollen wir andererseits abschätzen, welches die Elektrisierung von Körpern gegebener Formen sein wird, so können wir mit einem Fall beginnen, in welchem eine der Äquipotentialflächen eine der gegebenen einigermaßen ähnliche Form annimmt, und dann können wir auf probierende Weise das Problem so lange modifizieren, bis es dem vorliegenden Fall besser entspricht. Diese Methode ist offenbar vom mathematischen Standpunkt gesehen sehr unvollkommen, aber es ist die einzige, die wir haben[4]), und wenn wir unsere Bedingungen nicht beliebig wählen dürfen, so können wir die Elektrisierung nur angenähert berechnen. Es scheint deshalb, daß das, was wir brauchen, eine Kenntnis der Äquipotentialflächen und Kraftlinien[5]) in so viel verschiedenen Fällen ist, als wir irgend zusammenbringen und unserem Gedächtnis einverleiben können. In gewissen Fällen, wie in denen,

---

[1]) Gemeint ist das elektrostatische Problem (K.).

[2]) A. a. O. I, S. 177.

[3]) Vgl. die Bemerkungen zur Methodik der experimentierenden Physik, oben 57.

[4]) Von mir gesperrt (K.).

[5]) Im Original „Induktionslinien“. Ich setze das bekanntere Wort, da ja die Dielektrizitätskonstante überall hier als 1 vorausgesetzt ist.

welche Kugeln betreffen, sind mathematische Methoden bekannt, nach denen wir verfahren können. In anderen Fällen dürfen wir die bescheidenere Methode nicht verachten, Figuren zum Versuch aufs Papier zu zeichnen und diejenige auszuwählen, welche von der verlangten Form am wenigsten abweicht[1]).

Diese letztere Methode ist meines Ermessens von einigem Nutzen selbst in Fällen, in welchen die exakte Lösung schon erreicht worden ist; denn ich finde, daß eine anschaulich-optische Kenntnis (an eye-knowledge) der Formen der Äquipotentialflächen oft zu richtiger Wahl einer mathematischen Lösungsmethode führt[2])."

Hiernach geht Maxwell dazu über, eine Anzahl von Feldern zu zeichnen und zu besprechen, damit sich auf diesem wenig analytischen Wege dem Leser die auftretenden Formen als optische Gestalten einprägen — denn dies geradezu ist nach den zitierten Sätzen die Absicht — und ihn später, wenn eine bestimmte Leiterform anschaulich vorliegt, bei der Problembehandlung unterstützen. Daß im Jahre 1873, also bei einem glänzenden Entwicklungszustand der höheren Mathematik, jene Worte geschrieben werden konnten, erweist besser als weitere Auseinandersetzungen, daß die geläufigen Methoden der Infinitesimalrechnung und die gewöhnlichen Denkwege an dies Problem der Feldstruktur nicht heranreichen, wie Maxwell selbst es ja ausdrücklich sagt.

Erst gegenwärtig kann man glücklicherweise nicht mehr behaupten, daß das menschliche Denken für direkte Bestimmung elektrostatischer Strukturen (bei gegebenen Formen) keine allgemeine Methode habe; das Berechnen fast jeder Eigenfunktion im konkreten Fall wird zwar noch immer auf Hindernisse stoßen, aber diese beruhen anstatt auf prinzipieller Ratlosigkeit über den Operationsweg wohl nur mehr auf mathematischen Schwierigkeiten im engeren Sinn, wie sie bei vielen anderen Arten physikalischer und mathematischer Probleme auch vorkommen können (vgl. oben 65 und unten 71 ff.).

68. Die spezifische Schwierigkeit der Strukturaufgabe wurde in Zusammenhang gebracht mit der Natur der partiellen Differentialgleichungen überhaupt, welche nicht durch eine einfache Integration (im gewöhnlichen Wortsinn) für vorgeschriebene Grenzbedingungen zu lösen sind. Bei der Bedeutung, die dem behaupteten Zusammenhang zukommen müßte, insofern auf partielle Differentialgleichungen der vorliegenden oder verwandter Art die Probleme der mathematischen Physik immerfort hinführen, verdienen Fälle Beachtung, wo elektrostatische Probleme des gleichen Typus nicht durch partielle, sondern durch gewöhnliche Differentialgleichungen zu formulieren und bei gegebenen Grenzbedingungen durch Integration relativ einfach zu lösen sind. Betreffen diese Fälle nicht Strukturen? Oder zeigt sich in ihnen

---

[1]) ... und zugleich eine Niveaufläche in der Zeichnung bedeutet (K.).
[2]) A. a. O. I, S. 177 f.

an, daß vielleicht doch die gewöhnlichen Denkwege ausreichen, um solche Strukturprobleme mathematisch zu meistern, und daß wir nur noch nicht in allen Fällen erkannt haben, wie das anzustellen ist?

Zwei koaxiale Zylinder von kreisförmigem Querschnitt mit den Radien a und b seien in Richtung der Achse beiderseits so weit ausgedehnt, daß wir, bei Betrachtung von Feld und Ladung nur in der mittleren Region, jene Ausdehnung als unendlich ansehen können. Daraus folgt, daß für die betrachtete Mittelregion alle Leiter- und Feldstellen als gleichen Bedingungen hinsichtlich einer Koordinate unterworfen anzusehen sind (deren Richtung die der Achse ist), und also das Strukturproblem nicht von dieser Koordinate abhängen kann. Es bleibt nur die Laplacesche Gleichung in zwei Dimensionen, in einer Ebene senkrecht zur Zylinderachse zu lösen, und zu diesem Zweck wird sie in ebenen Polarkoordinaten dargestellt:

$$\frac{\partial^2 V}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial \varphi^2} \cdot \frac{1}{r^2} + \frac{\partial V}{\partial r} \cdot \frac{1}{r} = 0.$$

Um die Zylinderachse aber ist Leiter und Feldraum symmetrisch, die Lösung kann also auch nicht von der Richtung abhängen, welche der Winkel φ charakterisiert, und es bleibt:

$$\frac{d^2 V}{d r^2} + \frac{1}{r} \frac{dV}{dr} = 0,$$

eine gewöhnliche Differentialgleichung, die noch dazu dem am leichtesten lösbaren Typus angehört und ohne weiteres das allgemeine Integral

$$V = c_1 + c_2 ln\, r$$

ergibt. Hier sind c_1 und c_2 die Integrationskonstanten, und ln bedeutet den natürlichen Logarithmus. Das vorgeschriebene konstante Potential auf dem inneren Zylinder ($r = a$) sei V_a, auf dem äußeren ($r = b$) sei es durch Erdung Null. Die vollständige Lösung wird also:

$$V = V_a \cdot \frac{ln\, b - ln\, r}{ln\, b - ln\, a}.$$

Offenbar ist jeder Schritt der bekannten Rechnung eine ganz einfache Operation: Weshalb ist die charakteristische Strukturschwierigkeit in ihr nicht aufgetreten? Der Grund ist einfach, daß alles Wesentliche an der Aufgabe durch anschauliche Betrachtung der vorgeschriebenen Form bewältigt wurde, ehe die Rechnung begann, und daß diese auf gewöhnliche Denkoperationen führte, weil sie an einer im Grunde schon festgelegten Struktur geschah. Vor der Rechnung ist in unmittelbarer Problemvergegenwärtigung erstens erkannt, daß die Struktur im betrachteten Gebiet nicht längs der Zylinder variiert $\left(\frac{\partial^2 V}{\partial z^2} = 0\right)$, also in dieser Richtung homogen ist, und zweitens auf demselben Wege, daß sie rings um die Achse nicht variiert $\left(\frac{\partial^2 V}{\partial \varphi^2} = 0\right)$. Danach steht vor der Rechnung schon fest, daß die Äquipotentialflächen auch koaxiale Zylinder sind, und ebenso, daß die Ladung den inneren Zylinder (die Influenzladung den äußeren) im betrachteten Mittelgebiet homogen bedeckt, das heißt aber nichts anderes, als daß vor der Rechnung die Strukturaufgabe bereits gelöst und nur quantitativ als Potentialausdruck in Abhängigkeit von den absoluten vorgeschriebenen Konstanten auszudrücken war.

Von dieser Art sind alle die Fälle, welche z. B. Maxwell als „Simple Cases of Electrification" behandelt (a. a. O. I, S. 186 ff.). Daß die quantitative

Rechnung auf eine einfache Integration führt, ist also durchaus nicht im Widerspruch mit dem Gestaltcharakter der betreffenden Aufgaben. Zugleich sieht man, daß diese „einfachen Fälle“ identisch sind mit den oben (60) erwähnten; denn nur, wo die intuitiv-anschauliche Behandlung des Totalproblems möglich ist, kann man natürlich der Rechnung durch praktische Wahl des Koordinatensystems und durch Ausschaltung einzelner Koordinaten alles Wesentliche vorwegnehmen, weil man eben die Struktur vor der Rechnung eigentlich schon kennt[1]).

69. Der nach Maxwell beschriebene „umgekehrte“ Forschungsweg — auf dem man sich eine Sammlung willkürlich gewählter harmonischer Funktionen anlegt und zusieht, welche Äquipotentialflächen, welche möglichen Leiterformen also zu diesen Lösungen der Laplaceschen Gleichung passen — führt zur Erkenntnis einer sachlichen Eigenschaft der Strukturen, von welcher noch nicht die Rede war[2]). Wir haben gesehen, daß Leiterformen geometrisch ähnlichen Baues, d. h. solche, die sich nur durch ihren Maßstab bei Erhaltung der Proportionen unterscheiden, eine und dieselbe elektrostatische Struktur bedingen (zweites Ehrenfels-Kriterium). Daraus ergibt sich noch keinerlei Gesichtspunkt für einen Überblick über die Mannigfaltigkeit möglicher Strukturen überhaupt, außer etwa dem allgemeinen Gedanken, daß ein Ordnungsprinzip für die unendliche Menge von Strukturen zugleich ein solches für die Formen sein muß, von welchen jene ja bestimmt werden. Um physische Strukturen (und Formen) zu ordnen, wählen wir das folgende Prinzip, welches für eine erste Orientierung geeignet ist:

[1]) Der Inhalt des Paragraphen ist dazu bestimmt, Bedenken zu beseitigen, welche aus dem Vorkommen gewöhnlicher Differentialgleichungen bei physischen Strukturproblemen abgeleitet werden könnten, und reicht hierfür aus. Aber es taucht die Frage auf, ob die „Integration gewöhnlicher Differentialgleichungen“ wirklich eine Operation darstellt, die ganz prinzipiell etwas anderes ist als die Lösung partieller Differentialgleichungen bei gegebenen Grenzbedingungen. Es könnte auch sein, daß das Wort „Integrieren“ zwei etwas verschiedene Bedeutungen hat, je nachdem ob es eine Summenbildung als solche oder das Auffinden einer sogenannten „primitiven Funktion“ bezeichnet. Wir summieren freilich mit Hilfe unserer Kenntnis von primitiven Funktionen, aber deshalb braucht das Suchen nach einer primitiven Funktion selbst noch kein Summieren zu sein. Man muß also zusehen, ob nicht auch gewöhnliche Differentialgleichungen unter Umständen ein vollgültiges, wenn schon erheblich einfacheres Strukturproblem aufgeben. Ich bin geneigt, diese Frage zu bejahen. Sieht man genau zu, so führt die gewöhnliche Integration ebenfalls auf die größten Schwierigkeiten, wenn in einem Falle die „historische Kenntnis“ aus früherer zugehöriger Differentiation nicht mithelfen kann. Für die vorliegende Schrift kommt nichts auf die Entscheidung dieser neuen Frage an.

[2]) Zum Verständnis des folgenden Paragraphen ist vielleicht etwas größere Vertrautheit mit Potentialtheorie und Feldzeichnungen erforderlich. Da die späteren Ausführungen nicht auf ihn zurückgehen, kann er von denjenigen überschlagen werden, welche kein Interesse für allgemeine Morphologie haben.

Wer nach der „historischen (umgekehrten) Methode“ Maxwells vorgeht, findet im allgemeinen für eine willkürlich gewählte und als Potential gedeutete harmonische Funktion (Lösung der Gleichung $\Delta V = 0$) nicht einen hinzupassenden Leiter, sondern eine Serie von solchen. Denn für eine beliebige harmonische Funktion $V = f(x, y, z)$ kann jede der Äquipotentialflächen (welche man erhält, indem man die Funktion gleich einer Konstanten setzt und diese Konstante als einen Parameter variiert) als Oberfläche einer passenden Leiterform angesehen werden. Man streicht gewissermaßen das Gebiet des Feldes, welches innerhalb dieser Oberfläche (formal mathematisch) liegen würde, und darf das jedenfalls, wenn man zugleich nach der Formel

$$\sigma = -\frac{1}{4\pi}\frac{\partial V}{\partial n}$$

der Fläche eine Ladungsstruktur zuerteilt denkt; denn nach diesem Gesetz auf der Äquipotentialfläche ausgedehnte Momente machen ja das Potential innerhalb der Fläche wirklich konstant und also das Feld im Inneren Null. Dabei ist als $\frac{\partial V}{\partial n}$ stets der Differentialquotient in Richtung der äußeren Normalen, und zwar zu derjenigen Niveaufläche zu bestimmen, welche man aus der Schar dieser Flächen als Leiter ausgewählt hat. Für eine individuelle Fläche ist die Formel dann Ausdruck der Eigenfunktion (für die Ladungsstruktur auf der individuellen Fläche). Aber es gibt unendlich viele (im allgemeinen formverschiedene) Äquipotentialflächen, wenn in $V = f(x, y, z) =$ const. die Konstante als Parameter variiert; an jeder dieser Flächen ließe sich die entsprechende Operation vornehmen, und man sieht, daß die indirekte Methode Maxwells zu einer willkürlich ausgewählten Lösung von $\Delta V = 0$ in der Tat eine Serie zugehöriger Leiterformen liefert. Dadurch wird die Aufgabe, „auf historischem Wege“ die Lösung von Strukturproblemen vorzubereiten, natürlich enorm vereinfacht.

Da nun jeder dieser Leiterformen ihre Ladungsstruktur zugehört, so haben wir zugleich eine zusammengehörige Serie auch von solchen erhalten, welche offenbar durch folgende Eigenschaften charakterisiert ist:

A. Zu Ladungsstrukturen einer und derselben Serie (oder Schar) gehören Feldstrukturen, welche in begrenzten Feldbereichen ringsum übereinstimmen. Denn ich kann mir jede der Formen — und deshalb Ladungsstrukturen — in der Serie dadurch hergestellt denken, daß ich „von außen“, d. h. von kleinen Werten für const., herkommend in dem betreffenden Felde nacheinander immer weiter „nach innen“ liegende Niveauflächen der beschriebenen Operation

unterwerfe, also als geladene Leiter betrachte. Für jede folgende kommt zu dem Feld der vorhergehenden Form diese selbst, jetzt als weitere Feld-Äquipotentialfläche, hinzu. Bis auf die schmale Schicht zwischen ihnen stimmen also die Nachbarn in der Feldstruktur überein, für weniger eng benachbarte Flächen der Familie ist das ganze Feld des einen (des äußeren) beschränkte Feldperipherie des anderen (des inneren) Leiters. Die Anschauung macht das sofort klar.

B. Die Formen der Schar $V = f(x, y, z) = \text{const.}$ bilden eine stetige Mannigfaltigkeit. Infolgedessen veranlaßt eine geringe Variation des Parameters (const.) eine geringe Variation der Leiterform, wenn man z. B. „von außen nach innen“ vorgeht. Der Ausdruck $-\frac{1}{4\pi}\frac{\partial V}{\partial n}$, welcher die Ladungsstruktur jedesmal bestimmt, gibt aber, wenn nicht nur V, sondern auch $\frac{\partial V}{\partial n}$ (wie im elektrostatischen Felde) stetig variiert, ebenfalls eine stetig variierende Eigenfunktion σ für die Ladung an, d. h. die Ladungsstrukturen, die man bei langsamem Fortschreiten „von außen nach innen“ findet, weichen je von einer passenden Leiterfläche zur folgenden sehr wenig voneinander ab. Unmittelbar benachbarte Leiterformen und ebenso Ladungsstrukturen sind einander ähnlich. Jetzt bedeutet das Wort „ähnlich“ jedoch nicht mehr geometrische Ähnlichkeit (im üblichen Sinne), sondern eine Verwandtschaft anderer Art, für die Ladungsstrukturen eine Gestaltverwandtschaft nach bestimmtem Gesetz. Einem gut gezeichneten Feldbild kann man direkt anschaulich entnehmen, wie von einer zuerst als Leiter gewählten Fläche (Kurve) aus die Ladungsstruktur beim Übergang zu einer benachbarten Fläche um ein weniges mit der Variation dieser zu verschieben ist[1]).

Je nach der Wahl der harmonischen Funktion erhalten wir jedesmal eine andere Serie von physischen Formen und zugehörigen Ladungsstrukturen, und manche Serien entwickeln sich „nach innen“ zu einer beträchtlichen Komplizierung. Außen aber beginnt oder endet, wie man es ansehen will, jede Serie mit Kugelschalen; denn in einer Entfernung, die groß ist gegen alle im System geladener Körper vorkommenden Strecken, verschwindet das Potential jedesmal wie $\frac{1}{r}$, oder man kann auch sagen: in sehr großer Entfernung sind die Asymmetrien der leitenden Formen nicht mehr

[1]) Es kommt dabei auf die Abstände der benachbarten Niveauflächen an. Die Eigenstruktur variiert dort am schnellsten mit dem Übergang von einer Form zu ihren Nachbarn, wo diese Abstände am schnellsten wachsen oder abnehmen.

merklich wirksam. In der Kugel treffen sich also sämtliche Serien, und eine jede stellt einen stetigen Übergang beliebiger Ausgangsformen zur Kugel dar. Die Kugel (in der Ebene der Kreis) ist eine ausgezeichnete physische Form; dafür finden wir später noch ganz andere Belege. Zugleich ist die zugehörige Struktur eine physisch ausgezeichnete Gestalt.

Von hier aus kann man zu einer etwas allgemeineren Formen- (und Struktur-) Systematik kommen. Z. B. ergibt sich noch folgende Verwandtschaftsart ohne weiteres: In einer der Serien, also für eine bestimmte Funktion V, steigt man von der umschließenden Kugel zu irgendeiner der Niveauflächen auf und weiß jetzt (vgl. oben), daß alle weiter nach innen liegenden Äquipotentialflächen der gleichen Serie (als Leiter betrachtet) den bis dahin durchmessenen Bereich des Feldes übereinstimmend als periphere Feldschicht haben würden. Nun geht aber die Poincarésche Methode „de balayage“ von folgendem leicht beweisbaren Satz aus: Ist ein Feld von außen bis zu einer Begrenzungsfläche bekannt, so wird dadurch das Feld und hinzupassende Leiterformen im Inneren der Fläche durchaus nicht bestimmt, sondern es gibt unendlich viele innere Felder (Leiterformen und Strukturen), die außerhalb jener Begrenzungsfläche in dieselbe gegebene Feldperipherie übergehen müßten. Natürlich aber sind das nicht beliebige innere Fortsetzungen, sondern sie alle müssen einer einschränkenden Bedingung gehorchen, welche sich nach dem gemeinsamen äußeren Feldmantel bestimmt. Je weiter die Niveauflächen dieser äußeren Feldhülle bereits von einer Kugelschale charakteristisch abweichen, desto weniger Variationsfreiheit wird der inneren Fortsetzung gelassen. Daraus folgt: Nicht allein Formen einer Serie haben je nach ihrem Abstand in der Serie eine größere oder kleinere Feldperipherie gemeinsam, sondern wenn man von außen (von der Kugel) kommt, kann man an jeder Fläche eine unendliche, aber gesetzmäßige Mannigfaltigkeit von Wegen der weiteren Formentfaltung nach innen einschlagen. Oder auch: Verschiedene Serien V stimmen in größeren oder beschränkteren Bereichen der Peripherie (nach der Kugel hin) überein, während sie nach innen zunehmend ungleiche Form- und Strukturentwickelungen geben. Serien sind um so verwandter, je weiter innen sie schon in ein gemeinsames äußeres Feld einmünden. Die äußeren gemeinsamen Formen abstrahieren gewissermaßen von dem Speziellen, welches die von innen einmündenden Serien vorher unterschied. Auf diese Weise leiten sich in formaler Betrachtung alle vorkommenden Formen und Strukturen in der Art eines Stammbaumes oder einer „Begriffspyramide“ aus einer einzigen Grundform ab, die Fülle möglicher Strukturen kann in der Elektrostatik nach einem Ordnungsprinzip übersehen werden, und es scheint

möglich, daß allgemeiner physische Raumgestalten überhaupt natürlich gruppiert werden können, wie wir z. B. phänomenale Farben in Qualitätenreihen systematisch vereinigen. Goethe wäre an einer solchen Systematik physischer Raumstrukturen in Verwandtschaftsreihen lebhaft interessiert gewesen. Sie läßt sich wohl weiter ausbilden.

Oben hieß es: Wenn die Feldstruktur in beschränktem Bereich geändert werde, so bilde sich damit im allgemeinen das Feld durchweg um. Die Einschränkung bezieht sich auf die eben besprochenen Tatsachen. Ein Feld kann eben bei entsprechender Verschiebung der Form- (und Ladungsstruktur) von innen nach außen gesetzmäßig-schichtweise abgetragen werden. Ferner können Gruppen innen verschiedener Felder sich in äußeren Schichten decken.

Dieselben Verwandtschaften sind es, welche in der älteren Methodik bisweilen das Strukturproblem für geometrisch einfache Formen zu lösen gestatten. Ich kann hier nicht auseinandersetzen, wie die Gemeinsamkeit von äußeren Feldbereichen gesetzmäßig verwandter Formen (und Strukturen) z. B. die Kelvinsche Bildermethode möglich macht. Eine durchgeführte Systematik der Formen würde uns ähnliches noch in manchen Fällen sonst erlauben.

70. In allen vorausgehenden Überlegungen ist von mathematischen Ausdrücken die Rede, welche eine Gestalt durch ihre Momente an jedem Punkt der Leiteroberfläche oder des Feldes charakterisieren, also die Ladungsdichte oder das Potential (die Feldstärke, die Energiedichte) als Funktion der Raumkoordinaten angeben. Nun haben wir als fundamental den Gegensatz zwischen „summativen Verteilungen“ und „Strukturen“ kennen gelernt, welche zwei Unterklassen von „Gruppierungen“ sind. Wodurch wird an einer Funktion wie

$$\sigma = \frac{\eta}{4\pi abc} \cdot \frac{1}{\sqrt{\frac{x^2}{a^4} + \frac{y^2}{b^4} + \frac{z^2}{c^4}}},$$

welche die elektrostatische Eigenfunktion des Ellipsoids ist, gerade der Strukturcharakter des Gemeinten merkbar? Dieser Ausdruck soll das Moment einer Gestalt bedeuten, welches auf dem Ellipsoid überall nur besteht, indem es von der übrigen Struktur getragen wird und wieder sie trägt. Würde man aber willkürlich eine rein mathematische Größe an jedem Punkt entsprechenden Betrages der Ellipsoidfläche zuordnen, so hätte man es mit einer bloßen „Verteilung“ zu tun; denn für eine willkürlich angesetzte Funktion könnte der Betrag an beliebigen Stellen abweichend, beispielsweise auf der einen Hälfte des Ellipsoids gleich Null gewählt werden, ohne daß die übrige sich gleichbleibende Verteilung darauf irgend reagierte. Und doch würde der mathematische Ausdruck für eine solche Verteilung von punktweise entsprechenden Beträgen genau

derselbe sein, wie der Ausdruck für die Momente der elektrostatischen Eigenstruktur. Folglich gibt der mathematische Ausdruck an und für sich nicht an, daß es sich um Momente einer Gestalt handelt, und er soll das auch gar nicht, da die mathematische Sprache als allgemeinste Symbolik für alles Meßbare sowohl „Verteilungen“ als „Strukturen“ soll wiedergeben können[1]). Übrigens könnte man durch ein (zu vereinbarendes) Zeichen leicht darauf hinweisen, wann ein mathematischer Ausdruck die Momente einer physischen Struktur angibt.

71. Im Anschluß hieran sei vor einem Irrtum gewarnt, der das Verständnis der mathematischen Strukturbehandlung und des Strukturproblems sehr erschweren würde. Wenn mathematisch angegeben werden soll, daß ein Leiter gegebener Form seine Ladung in Eigenstruktur trägt, so kann das z. B. geschehen, indem man schreibt:

$$\iint \frac{\sigma\, dS}{r} = \text{const.}$$

Die Integration ist über die Leiteroberfläche S zu erstrecken, r bedeutet den Abstand jedes Leiterpunktes, der dabei passiert wird, von einem bei der Integration festgehaltenen (übrigens beliebigen) Punkt im Inneren des Leiters, σ ist die Ladungsdichte als Funktion der Raumkoordinaten, und die ganze Gleichung sagt aus, daß das Integral, als Ausdruck des Potentials in und auf dem Leiter, unabhängig von der Wahl des inneren Punktes stets ein und denselben Wert geben muß. Ich habe mehrfach die Erfahrung gemacht, daß der Sache Fernerstehende, durch das Aussehen der Gleichung verführt, hier zu sagen pflegen: Also ist es doch ein Integral, d. h. eine Summierung, welche die sogenannte Struktur bestimmt! Auch an diesem für unser Hauptproblem so wesentlichen Beispiel soll gezeigt werden, daß eine vorliegende Gleichung (allgemeiner ein vorliegender mathematischer Ausdruck) je nach der Definition der darin auftretenden Größen, also nach Dingen, welche nicht mit in die Gleichung hineingeschrieben werden, ganz verschiedene Bedeutungen haben kann; dabei wird von selbst klar, daß jener Ausspruch vollkommen unberechtigt ist.

Erstens könnte eine Gleichung wie die vorliegende besagen, daß die verlangte Integration wirklich ausführbar, ja daß sie schon ausgeführt ist und bei der Ausführung die angegebene Konstante geliefert hat. Dann enthielte die Gleichung die fertige Lösung eines gewöhnlichen Integrationsproblems, und es bliebe nichts mehr zu fragen. Aber das wäre nur dann der Fall, wenn σ eine be-

[1]) Vgl. hierzu Wertheimer, Über d. Denken d. Naturvölker I, Zeitschr. f. Psychol. **60**, 349 f.

kannte Funktion darstellte; denn sonst hätte man eben nicht integrieren können.

Zweitens kann die Gleichung Ausdruck einer Bedingung für die unbekannte Funktion σ sein, d. h. diese Funktion soll erst derart bestimmt werden, daß sie, unter dem Integralzeichen in der vorgeschriebenen Weise mit anderen Größen (Variablen) kombiniert, die in der Gleichung fixierte Integralbedingung erfüllen würde. Einerseits läßt sich also dann die Integraloperation gar nicht ausführen, da ja erst bestimmt werden soll, welche Funktion σ unter das Integral zu setzen wäre, und andererseits besteht gar kein Bedürfnis nach Ausführung der Operation, da das, was die Integration ergeben soll, ja gerade von vornherein feststeht.

Der Zusammenhang zwischen dem Integrieren (Summieren) und der Eigenfunktion ist also in dem uns interessierenden zweiten Falle nur der, daß σ, wenn ich es irgendwie richtig ermittelt haben werde, nachher in einer bestimmten Summationsoperation etwas Vorgeschriebenes muß leisten können, und daß sich dieser Hinweis möglicherweise bei der Ermittelung verwenden läßt. Das ist aber etwas ganz anderes, als σ durch rein summative Operationen finden. Nicht jeder Ausdruck, in welchem das Symbol der Integration auftritt, gibt eine durch Summieren zu lösende Aufgabe an.

Bedingungsgleichungen wie die obenstehende heißen Funktionalgleichungen oder wegen der Operation, die in diesem Falle die Bedingung beherrscht, auch Integralgleichungen. Die Bestimmung elektrostatischer Eigenstrukturen pflegt allerdings von Integralgleichungen etwas anderer Form auszugehen.

Der ausgebildete Mathematiker ahnt wohl in der Regel gar nicht, welche Schwierigkeit ein Lernender zuerst überwinden muß, ehe er diesen Unterschied ganz erfaßt. Bei den ersten Bemühungen, in die Variationsrechnung einzudringen, treten ähnliche Denkschwierigkeiten auf, und zwar auch aus ähnlichem Anlaß.

72. An einer früheren Stelle wurde kurz erwähnt, wie sich eine Gestalt von relativ einfachen Eigenschaften ergibt, wenn mehrere Leiter durch feinste Fäden nur „leitend verbunden“ und dabei so weit voneinander entfernt sind, daß sie gegenseitig ihre Eigenstrukturen nicht durch unmittelbare Feldwirkung merklich stören. Da die Methodik, wie wir sahen, überall die Beschaffenheit ihrer Untersuchungsobjekte gewissermaßen abbildet, so muß sich in derselben Hinsicht, in welcher dieses elektrostatische Gebilde selbst einfacher ist, auch seine theoretische Bestimmung erleichtert zeigen, und so können wir die mathematische Aufgabe wenigstens im Falle solcher „schwachen Gestalten“ hier betrachten.

Wenn jeder der Leiter die ihm in einem System dieser Art zukommende Ladung in Eigenstruktur enthält, so fragt sich nur mehr, welchen Ladungsbetrag ein jeder im ganzen aufnimmt, bis alle ein und dasselbe Potential besitzen. Nun kann man aber, wenn die Eigenstruktur für eine physische Form als gegeben vorausgesetzt werden darf, sehr leicht feststellen, welcher Ladungsbetrag den Leiter gerade dieser Form (und Größe) auf ein bestimmtes Potential (z. B. ein Volt) bringt oder sein Potential um eine Maßeinheit erhöht. Dieser übrigens auch direkt meßbare Betrag, welcher anschaulich die elektrostatische Kapazität des betreffenden Leiters genannt wird, ist (mit der Eigenstruktur) im verbundenen System der gleiche wie für den Leiter, wenn er allein dastände. Dann ergibt sich für die Elektrizitätsmenge η_n, welche den $n$ten Leiter von der Kapazität C_n auf das Potential V_n bringt: $\eta_n = C_n V_n$. Im leitend verbundenen System tritt Ruhe ein, wenn alle V_n das gemeinsame Ruhepotential V erreicht haben, und so finden wir den Komplex zusammen bestehender Gleichungen:

$$\begin{aligned} \eta_1 &= C_1 . V, \\ \eta_2 &= C_2 . V, \\ &\cdots\cdots \\ \eta_n &= C_n . V, \\ &\cdots\cdots \end{aligned}$$

oder nach Elimination von V:

$$\eta_1 : \eta_2 : \ldots : \eta_n : \ldots = C_1 : C_2 : \ldots : C_n : \ldots,$$

für im ganzen p Leiter $(p - 1)$ Gleichungen, zu denen als $p$te hinzutritt:

$$\eta = \eta_1 + \eta_2 + \cdots + \eta_n + \cdots \eta_p,$$

d. h. das Gesetz von der Erhaltung der Elektrizität, wenn η der Gesamtbetrag elektrischer Ladung ist, der dem System überhaupt zugeführt wurde, und wenn die Ladungen der Verbindungsfäden vernachlässigt werden dürfen. Die Aufgabe ist damit gelöst; auf den $n$ten Leiter entfällt in Ruhe der Ladungsbetrag

$$\eta_n = \eta \cdot \frac{C_n}{C_1 + C_2 + \cdots C_n + \cdots},$$

und dieser Ausdruck leistet für das vorliegende Beispiel einer schwachen Gestalt dasselbe, wie die Angabe der Eigenfunktion (Ladungsdichte an jedem Oberflächenpunkt eines Leiters) für die starken Gestalten.

73. Viel einfacher kann eine Rechnung nicht sein, als die Lösung eines solchen Komplexes von simultanen Gleichungen. Der letzte Grund hierfür ist darin zu suchen, daß das sonst so schwierige Problem der Abhängigkeit aller Momente eines Leiters von der

Leiterform durchweg hier ausgeschaltet oder als gelöst vorausgesetzt wird. Die Form der einzelnen Ladungsträger — welche ja wegen der Fadenverbindung einen einzigen großen Leiter darstellen — kommt nur noch in etwas versteckter Art für die schwache Gestalt in Betracht, insofern die einzelnen Eigenstrukturen die zugehörigen Kapazitäten wesentlich mitbestimmen. Aber da diese Größen sehr wohl meßbar sind, so kann in einem solchen Falle das eigentliche Formproblem wirklich umgangen werden, wenn schon es bei ganz theoretischer Fragestellung für die einzelnen Ladungsträger nach wie vor besteht. In der Aufgabe, die wir eben betrachten, vertritt jedenfalls ein fixer Zahlenbetrag für jeden (quasidiskreten) Ladungsträger, eben seine Kapazität, diesen Ladungsträger vollkommen nach Größe und Form, wie ja auch ein diskreter Ladungsbetrag im ganzen für ihn das „Moment" ist, welches wir berechnen. Statt einer stetigen Mannigfaltigkeit unendlich vieler und deshalb als Funktion zu bestimmender Punktmomente haben wir es mit einer endlichen Zahl auf einzelne Kapazitäten entfallender Ladungsgrößen zu tun. Die Problemformulierung verliert demgemäß den Zusammenhang mit der höheren (d. i. Stetigkeits-) Analysis und läßt sich in eine endliche Anzahl einzelner, aber zugleich zu erfüllender Bedingungen für je zwei Leiter auseinanderbreiten; das sind die oben angegebenen $(p-1)$ Gleichungen. Man spürt mathematisch, daß hier längst nicht mehr im gleichen Grade „alles in alles eingreift".

Zugleich sehen wir uns auf die Frage geführt, ob es nicht noch schwächere Gestalten gibt, d. h. solche, für die nicht einmal in relativ abgesonderten Einzelgebieten eine Abhängigkeit von Raumformen übrig bleibt. Diese Frage können wir bereits bejahen; denn eine Gestalt dieser Art haben wir ja in physiologischem Zusammenhang als die erste überhaupt behandelt (vgl. Abschnitt I).

74. Daß die Lösung leicht ist, kann man also gut verstehen. Aber handelt es sich denn überhaupt noch um eine Gestalt? Das untersuchte Gebilde hat folgende entscheidende Eigenschaften: Jede Änderung der Ladung auf einem der Leiter ergibt eine Verschiebung durch das ganze System; die Gesamtladungen, die wir deshalb als Gesamtmomente mit Recht bezeichnen können, „tragen sich" im Ruhezustand. Eine Bedingung, die für das System im ganzen zu erfüllen ist, bestimmt die Ausbreitung der Ladung auf die einzelnen Leiter (Gemeinsamkeit des Ruhepotentials wie im Fall der starken Gestalten). Der Ausdruck für ein Gesamtmoment

$$\eta \cdot \frac{C_n}{C_1 + C_2 + \cdots C_n + \cdots}$$

zeigt natürlich ebenso, daß die Ladung, welche auf C_n entfällt, von allen übrigen Kapazitäten mitbedingt wird; soviel ist von der

Eigenschaft starker Gestalten übrig geblieben, in denen ja jedes Moment von der Form durchweg abhängt. Werden alle Kapazitäten im gleichen Maße vergrößert oder verkleinert, so ändern sich nach der Formel für η_n die Gesamtmomente nicht, das Gebilde ist bezüglich seiner bedingenden Daten transponierbar, nur von ihren Verhältnissen abhängig (2. Ehrenfels-Kriterium). Endlich kann die Ladung aller Leiter zugleich in demselben Verhältnis gesteigert oder herabgesetzt werden, ohne daß eine Verschiebung zwischen den Momenten eintritt, das untersuchte Gebilde ist unabhängig von der absoluten Ladung. In der Tat liegt also eine Gestalt vor, und es ist für das Folgende wichtig, daß ein so einfaches Gleichgewicht, eine so einfache und häufig in der Physik auftretende Rechnungsaufgabe die wesentlichen Züge der Kategorie beibehalten.

Ich erinnere nochmals daran, daß es sich darum handelte, Gestalten, wo sie in der Physik vorkämen, sehen zu lernen, nicht etwa darum, bisher überhaupt unbekannte Seiten der Physik sachlich neu zu entdecken. Man kann allerdings darüber erstaunen, daß wir, bei einer solchen Sachlage schon in der einfachsten Elementarphysik, in der Psychologie das Auftreten irgendwie ausgedehnter Gebilde mit überadditiven Systemeigenschaften als ein ganz neues Problem oder gar als Paradoxon empfunden haben. In den ersten Versuchen, den Gestaltbegriff in die Psychologie einzuführen, wurden wohl ältere Anschauungen als ein „Physikalisieren" des Psychischen gedeutet. Damit hat man der Physik Unrecht getan; in dieser Wissenschaft werden komplexe Untersuchungsgegenstände durchaus nicht als geometrische Muster selbständiger Stücke behandelt, welche allenfalls etwas über sich „fundieren" könnten. Wären wir wirklich physikalischer (und weniger geometrisch) in der Psychologie vorgegangen, so hätte uns das wahrscheinlich manchen Vorteil und schnelleres Fortschreiten gebracht.

75. Eine schwache Gestalt ist in verschiedenem Maße einfach, je nachdem, ob zahlreiche oder wenige Eigenstrukturen auf ebenso vielen Leitern und miteinander leitend verbunden in sie eingehen. Der allereinfachste Fall dieses diskreten Typus liegt offenbar vor, wenn es sich um nur zwei Leiter und also um zwei leitend verbundene Eigenstrukturen handelt. Dann gelten die Gleichungen

$$\eta_1 : \eta_2 = C_1 : C_2 \quad \text{und} \quad \eta = \eta_1 + \eta_2.$$

Da die erste ohne weiteres die relativen Momente auf beiden Seiten angibt, wie sie einander, einerlei bei welcher absoluten Ladung tragen, so genügt im Grunde diese Proportion zur vollkommenen Charakterisierung der einfachen Gestalt und zeigt, daß die Momente das Verhältnis der beiden Kapazitäten wiedergeben. Haben z. B. beide Leiter gleiche physische Form, aber verschiedene Größe, so wird das Verhältnis der Kapazitäten gleich dem der Leitermaßstäbe, und wir sehen, daß eine geometrische Eigenschaft der beiden physischen Formen durch die Ladungs-

momente als einfachste physische Gestalt in einem gewissen Sinne lebendiger abgebildet wird. Die beiden Leiterformen stellen an und für sich eine summative Gruppe dar; aber die Ladung auf ihnen ist eine einzige Gestalt für beide zusammen, deren spontane Ausbreitungsart von einer additiven Zusammensetzung wohl unterschieden werden muß. Trotzdem bestehen dabei die beiden Eigenstrukturen ungestört, wir haben es eben mit einer schwachen Gestalt zu tun. Solche Extreme von Gestaltvereinfachung, die ein bloß geometrisches Zueinander zweier bedingenden Daten real-dynamisch[1]) wiedergeben, kommen auch bei anderen Gestaltarten vor und werden für die Theorie der nervösen Funktionen von größter Wichtigkeit.

76. Wenn die schwachen Gestalten sachlich nur als einfachere Gebilde übrigens gleicher Grundart wie starke Strukturen anzusehen sind, dann muß nach einem mehrfach erwähnten Prinzip wieder umgekehrt ein Zusammenhang auch zwischen den theoretisch-mathematischen Problemen und Methoden in beiden Fällen bestehen; wie sachlich, so muß das Gestaltgebiet auch der Theorie nach als ein geschlossener Problembereich darzustellen sein, und wir haben noch die Aufgabe, einen Übergang von der elementaren mathematischen Methodik für schwache Gestalten zu der theoretischen Bestimmungsart starker Strukturen zu suchen. Bei diesem Übergang treffen wir auf zwei den starken Gestaltproblemen eigentümliche Züge, welche nach dem vorigen Paragraphen offenbar die enorme Erschwerung bedingen: die Stetigkeit der Gebilde, welche berechnet werden sollen, und ihre unmittelbare Abhängigkeit von räumlicher Topographie (Formen) bis ins einzelne.

In rein formaler Betrachtung kommt man schnell zum Ziel. Denken wir uns die Oberfläche eines gegebenen Leiters durch zwei sich schneidende Kurvenfamilien gesetzmäßig in kleine Flächengebiete eingeteilt, so entfallen auf ein jedes von ihnen bestimmte Ladungsbeträge der Eigenstruktur, welche von der Form des Leiters durchweg bestimmt werden. Wir machen die unzutreffende Voraussetzung, daß diese Beträge in einem mittleren Punkt jedes Elementes, etwa in seinem Schwerpunkt, konzentriert seien, und stellen unter dieser Fiktion die Bedingung dafür auf, daß in jedem der Oberflächenelemente (wie übrigens im ganzen Leiter) das Potential V ein und dasselbe sei. Wenn die Ruhestruktur besteht, so ergibt sich dieses Potential überall als die Summe der Potentiale aller Ladungsmomente für die betreffende Oberflächenstelle. Bezeichnet man die Ladungen der kleinen Flächengebiete mit $\Delta\eta_1$, $\Delta\eta_2$, ... usw.,

[1]) „Dynamisch“ hier im Gegensatz zu „geometrisch“, nicht zu „statisch“.

die gegenseitigen Abstände der Punkte 1, 2, 3, ... usw. mit r_{12}, r_{13}, ..., r_{23}, ... usw., so soll also sein[1]):

$$\text{Für den Punkt 1:} \quad \frac{\Delta\eta_1}{r_{11}} + \frac{\Delta\eta_2}{r_{21}} + \cdots = V,$$

$$\text{„ „ „ 2:} \quad \frac{\Delta\eta_1}{r_{12}} + \frac{\Delta\eta_2}{r_{22}} + \cdots = V,$$

$$\cdots\cdots\cdots \qquad \cdots\cdots\cdots \qquad = V.$$

Elimination von V gibt:

$$\frac{\Delta\eta_1}{r_{11}} + \frac{\Delta\eta_2}{r_{21}} + \cdots = \frac{\Delta\eta_1}{r_{12}} + \frac{\Delta\eta_2}{r_{22}} + \cdots = \cdots,$$

und das ist ein System von homogenen linearen Gleichungen, welches wenigstens formal dem System simultaner Gleichungen im Fall schwacher Gestalten genau entspricht und zugleich in den Größen r die Abhängigkeit der Gestalt von den Raumformen zu erkennen gibt.

Nun sind die Momente der wahren Struktur nicht in Punkten endlich ausgedehnter Oberflächengebiete konzentriert, und wir haben nicht berücksichtigt, daß innerhalb jedes Flächengebietes das Strukturproblem auch noch besteht, daß damit zugleich die r keine sichere Bedeutung haben usw. Wenn aber die Einteilung der Oberfläche weiter und weiter verfeinert wird, dann fällt diese Schwierigkeit immer mehr fort, genauer gesagt, die Fehler, die wir machen, werden immer kleiner, je mehr die Flächenelemente zusammenschrumpfen; zugleich wächst freilich die Zahl der zu ermittelnden Unbekannten und ebenso die Zahl der simultanen Gleichungen. Beim Übergang zu unendlich vielen, unter jede verlangte Grenze verkleinerten Flächengebieten, zu unendlich vielen Unbekannten und unendlich vielen Gleichungen wird aus einem $\Delta\eta$ ein σdS, wo σ das Moment an einem Punkt, dS das zugehörige Flächendifferential ist, die r werden wohldefinierte und stetig variierende Abstände je eines Flächenpunktes von den übrigen, und die Summen, welche einander gleich sein sollen, werden Integrale:

$$\iint \frac{\sigma dS}{r}.$$

Ein jedes der Integrale ist über die ganze Oberfläche zu erstrecken, und die Größen r bedeuten die Abstände aller Oberflächenpunkte nacheinander von einem von ihnen, der für die

---

[1]) Da es sich hier nur um den formalen Zusammenhang handelt, nicht um mathematische Beweise, so kann unerörtert bleiben, inwiefern die Operationen mit $\frac{1}{r_{11}}$, $\frac{1}{r_{22}}$ usw. sinnvoll bleiben.

einzelnen Integrale jedesmal ein bestimmter festzuhaltender ist. Daß alle diese Integrale den gleichen Wert ergeben sollen, kann man ausdrücken durch

$$\iint \frac{\sigma dS}{r} = \text{const.},$$

und das ist für die Eigenfunktion σ eine Integralgleichung der oben bereits kurz besprochenen Form. Durch die soeben vollzogene Überlegung wird deutlich, daß eine solche Integralgleichung das Produkt eines Grenzüberganges von sehr vielen simultanen algebraischen Gleichungen (schwache Gestalt) zu unendlich vielen für die stetige Raumstruktur oder starke Gestalt ist. Die Einheit des mathematischen Problems für schwache und starke Gestalten ist damit formal aufgewiesen.

Da sich diese Integralgleichung jedoch wenig geeignet zur Bestimmung von σ erweist, so zieht man eine andere Funktionalbedingung vor, welche nicht vom Potential, sondern von der Feldstärke in den Oberflächenpunkten ausgeht[1]). In einem Punkt der Leiteroberfläche hat die Feldstärke in Richtung der äußeren Normalen den Wert $2\pi\sigma$, wenn σ das Moment an dem Punkte bedeutet. Dieser Wert der Feldstärke aber soll in Ruhestruktur die Resultante aller normal nach außen gerichteten Felder sein, welche die sämtlichen einander tragenden Momente der ganzen Fläche in dem betreffenden Punkte erzeugen. Nennen wir σ' diese Momente im allgemeinen, wie sie über die Fläche ausgebreitet liegen, und r ihren Abstand von dem festen betrachteten Punkte, so ist das Feld der kleinen Elektrizitätsmenge $\sigma' dS$ für jenen Punkt $\frac{\sigma' dS}{r^2}$, und die Komponente dieses Feldes in Richtung der äußeren Normalen n wird

$$\frac{\sigma' dS}{r^2} \cos(r, n),$$

wo (r, n) den Winkel zwischen r und der äußeren Normalen am Orte von σ angibt. Alle $\sigma' dS$ der ganzen Fläche zusammen sollen nach dem Gesagten den Feldwert $2\pi\sigma$ im untersuchten Punkte geben, und wir erhalten:

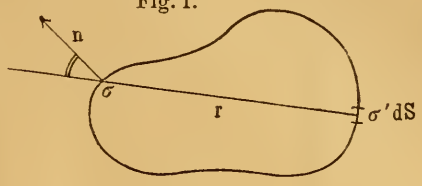
$$\sigma - \iint \frac{\sigma' \cos(r, n)}{2\pi r^2} dS = 0.$$

Die Eigenfunktion soll derart bestimmt werden, daß bei Auswahl irgendeines Oberflächenpunktes das entsprechend ausgeführte Integrieren (über die ganze Fläche) gerade das Moment der Struktur an dem gewählten Punkte ergibt. Ähnlich wie es eben geschah,

[1]) Die gewöhnliche Ableitung geht von dem Potential einer „Doppelschicht“ aus und findet für dieses genau dieselbe Integralgleichung. Ich möchte den Begriff der Doppelschicht nicht eigens hierfür heranziehen.

scheint Robin diese Bedingung zuerst abgeleitet zu haben[1]); in der Theorie der Integralgleichungen, wo man sie auf andere Weise zu begründen pflegt, tritt die Bedingung als der spezielle Fall einer homogenen Integralgleichung zweiter Art auf. Auch sie kann genau wie die oben schematisch behandelte Potentialbedingung als Produkt eines Grenzüberganges von einer endlichen Zahl simultaner algebraischer Gleichungen her dargestellt werden und bestätigt deshalb die innere Einheit des Problems für starke und schwache Gestalten[2]). Aber Fredholm und Hilbert haben etwas ungleich Wichtigeres entdeckt und bewiesen: Auch die Methoden zur Lösung von Integralgleichungen können durch Grenzübergang zum Stetigen von der Berechnungsart simultaner algebraischer Gleichungen her abgeleitet werden. Damit verliert der Zusammenhang seinen nur formalen Charakter, und die Einheit in der theoretischen Behandlung der physikalischen Gestaltprobleme wird vollständig.

Fig. 1.



Der Übergang vom schwachen zum starken Gestaltproblem kann nicht nur an den fertigen mathematischen Theorien vollzogen werden, sondern schon Volterra, dann in entscheidender Weise Fredholm wurden bei ihren Untersuchungen von dem Gedanken geleitet, daß die linearen Integralgleichungen Grenzfälle von Systemen linearer algebraischer Gleichungen seien, d. i. dem Problemausdruck für schwache Gestalten. Diese Idee hat sich seither als fast erstaunlich fruchtbar erwiesen.

77. Durch die Untersuchungen der letzten Abschnitte kommen wir in die Lage, nach drei Richtungen viel weiter zu sehen, als nach Ableitung der Gestalteigenschaften nur von elektromotorischen Kräften zwischen verschiedenen Lösungen möglich war. Die Abhängigkeit der Gestalten von Raumformen, wie sie die starken elektrostatischen Strukturen der Ladung, des Feldes und der elektrostatischen Energie aufweisen, ist verständlich geworden. Zweitens hat das jetzt behandelte Gebiet so viele allgemeine Eigenschaften mit anderen Bereichen der Physik gemeinsam, daß jede Befürchtung schwindet, wir könnten in die Untersuchung von einzelnen Spezialfällen verirrt sein. Der Grundcharakter dessen, was in der Physik überhaupt als Gestalt anzuerkennen ist, hat sich damit drittens merklich geklärt, wohlbekannte und feste Begriffe der Naturwissenschaft zeigen engsten Zusammenhang mit der untersuchten Kategorie.

[1]) Vgl. Chwolson, a. a. O. IV, S. 154f. (der französischen Ausgabe).

[2]) Eine kurze Darstellung des Überganges findet sich bei Heywood und Fréchet, L'équation de Fredholm usw., Paris, Hermann, 1912, S. 49f.

Abschnitt III.

Die physischen Gestalten in Ruhe und im stationären Zustande.

Erstes Kapitel.

Die starken Gestalten.

78. Weil die Gestalteigenschaften elektrostatischer Strukturen besonders leicht zu demonstrieren und zu überschauen sind, wurde an diesem Beispiel mit einiger Breite aufgewiesen, was wir nun um so leichter an anderen und zum Teil wohl physisch bedeutenderen Strukturen wiedererkennen können. Weiterhin braucht deshalb nicht in jedem Einzelfalle ausführlich bewiesen zu werden, inwiefern eine physische Erscheinung Gestaltmerkmale besitzt, sondern wir haben bereits Mittel in der Hand, eine größere Anzahl von physikalischen Gestalten ohne weiteres herauszusondern. Von vornherein bestand die Erwartung, wenn sich überhaupt eine oder die andere Gestalt in der Physik fände, würde sich damit zugleich ein allgemeineres Prinzip für das Forschen nach ihresgleichen von selbst einstellen; und es muß geradezu so sein, falls wirklich mehrere physische Gebilde, denen man Gestaltcharakter zuschreiben darf, als Angehörige einer natürlichen Gruppe mit innerlich gleichartigen Eigenschaften in der Physik vorliegen.

79. Aus der Betrachtung elektrostatischer Strukturen ergeben sich mindestens sechs solche Hinweise für die weitere Untersuchung, und zwar auf folgende Art:

A. Die Struktur auf Leitern und im Felde um sie stellt die spontane Ausbreitungsart im Raume dar, in welcher gewisse Skalare und Vektoren bei gegebenen und bestimmenden physischen Formen einander tragen. Als sich tragende Größen kann man in diesem Falle sowohl Ladungen wie dielektrische Verschiebungen (Maxwell) wie endlich Energien ansehen. Daß Energie nichtsummativ ausgebreitet, also in Struktur vorkommt, kann aber unmöglich ein singuläres Faktum gerade nur in der Elektrostatik sein, und

so wird man andere Fälle suchen, in denen ebenfalls physische Größen und mit ihnen Energie bei gegebenen Formen spontan eine bestimmte Ausbreitungsart im Raume annehmen. Wahrscheinlich sind solche Gebilde sämtlich Gestalten, Momente einer Struktur tragen sich in der spezifischen Gruppierung, das physische Material ist nicht nur „verteilt".

B. Starke Gestalten werden im allgemeinen der Beobachtung und messenden Untersuchung besondere Schwierigkeiten bereiten wie die elektrostatischen Strukturen, derart, daß der Versuch, die Struktur der betreffenden Erscheinung experimentell zu ermitteln, nicht nur mühselig und unvollkommen ausfällt, sondern sogar dahin tendiert, das Untersuchungsobjekt selbst zu ändern und zu stören. Fälle, in denen dergleichen vorkommt, wird man also auf Gestalteigenschaften prüfen.

C. Die elektrostatischen Gestalten sind uns durch ihre „quasiapriorische" Bestimmbarkeit aufgefallen; eine ungeheuere Mannigfaltigkeit möglicher Strukturen dieses Gebietes ist, wie wir wissen, von einem einzigen sicheren Erfahrungssatz aus denknotwendig bestimmbar, wenn nur jedesmal die „physische Topographie" gegeben wird, von welcher im ganzen die Struktur abhängen soll. Man wird vermuten, daß dies eine Eigenschaft der physikalischen Gestalten im allgemeinen ist, und nach anderen Beispielen suchen, wo auf einem und demselben Gebiete beliebig viele an sich komplexe physische Probleme für ebenso viele jedesmal gegebene Bedingungen von einem Minimum an Erfahrung aus denknotwendig bestimmt werden. Der Verdacht, es handle sich um Gestalten, wird um so stärker sein, wenn der Hinweis B. zu gleicher Zeit erfüllt ist, die betreffenden Probleme deshalb in der Experimentalphysik nach Möglichkeit umgangen oder reduziert werden und dafür wichtige Untersuchungsobjekte der Mathematik und theoretischen Physik bilden.

D. Im Falle starker Gestalten wird das Quasiapriori der Problemlösung notwendig zugleich bestehen müssen mit ganz spezifischen Schwierigkeiten, die denknotwendige Bestimmung wirklich auszuführen, da sie ja nicht „an Teilen" begonnen werden kann. Unter einfachen Bedingungen wird zwar die Struktur aus bloßer Vergegenwärtigung des Problems sich auf einmal ergeben, aber gerade da werden wir vermuten, Gestalten vor uns zu haben, wo diesen einfachen Fällen bei geringer Komplizierung der Bedingungen schon andere gegenüberstehen, welche mit den gewöhnlichen Mitteln auch der Infinitesimalrechnung nicht zu bestimmen sind. Da dies in der auffälligsten Weise bei physikalischen Problemen der Fall ist, welche in der Form einer partiellen Differentialgleichung mit gegebenen Grenzbedingungen auftreten, so haben

wir vorläufig alle Gebilde als möglicherweise gestaltet anzusehen, für welche dieses als eine adäquate Problemformulierung gelten kann. Doch schließen wir auch weiterhin diejenigen Differentialgleichungen zunächst von der Untersuchung aus, in denen Derivierte nach der Zeit vorkommen.

E. Es ist ebenso wahrscheinlich, daß physikalische Aufgaben, für welche neuerdings Integralgleichungen und die Fredholmsche Methode als natürliche Problemstellung und prinzipieller Lösungsweg erscheinen, auch außerhalb der Elektrostatik starke Gestalten zum Gegenstand haben. Die neuen Gleichungen und die Fredholmschen Theoreme sind in so nahem Zusammenhang mit den spezifischen Schwierigkeiten partieller Differentialgleichungen entwickelt worden, daß man schon aus D. schließen könnte, daß das Anwendungsgebiet der Integralgleichungen durchweg physikalische Gestalten enthält, und daß diese Methode deshalb als Wegweiser für die Sache dienen darf.

F. Zu dieser Annahme wird man auch dadurch gedrängt, daß Integralgleichungen in einem Grenzübergang von Systemen simultaner algebraischer Gleichungen abgeleitet werden können, und diese Systeme, wie gezeigt wurde, nichts anderes wiedergeben als die endliche Zahl zugleich zu erfüllender Bedingungen gegenseitigen Sichtragens in schwachen Gestalten. — Eben dieser methodologische Sachverhalt veranlaßt aber auch zu einer Umschau danach, wo in den Wissenschaften von der anorganischen Natur solche Systeme simultaner algebraischer Gleichungen den Ansatz zur Problemlösung bilden. Es erscheint als fast unmöglich, daß der Sinn so ausgedrückter Beziehungen zwischen physischen Größen jemals ein prinzipiell anderer werde als im elektrostatischen Fall. Wenn man danach Komplexe simultaner Gleichungen als Anzeichen schwacher Gestalten anzusehen hat, so wird man in jedem Fall auch noch prüfen, ob auf gleichem physikalischen Gebiet nicht auch starke Gestalten vorkommen.

80. Außer diesen sechs Hinweisen könnten aus der Betrachtung elektrostatischer Gestalten leicht noch andere entnommen werden. So ist z. B. die Eigenstruktur für einen Leiter nichts anderes als diejenige Materialgruppierung, in welcher die Ladung usw. spontan ihr Gleichgewicht erreichen. Also ist zu erwarten, daß man in allen Fällen physischer Gleichgewichte auf Gebilde von Gestaltcharakter stoßen wird. Das mag zutreffen, gibt aber für unsere Ziele keinen geeigneten Weg an, vielmehr sieht man sich auf solche Weise zu speziellen Untersuchungen auf dem Gebiet der Mechanik geführt, die in dieser Schrift nicht unternommen werden sollen. Die wahrscheinlich wichtigsten Gestalten sind übrigens gerade nicht Gleichgewichte.

81. Während also ein Suchen nach Gestalten, welches auf sachliche Durchprüfung der einzelnen physikalischen Gebiete

gerichtet wäre, überall zu etwas langwierigen Betrachtungen führen müßte, weisen die angegebenen Merkmale, der Mehrzahl nach solche der Gestaltenmethodologie, auf ganz an der Oberfläche der physischen Untersuchungsgebiete liegende und sozusagen schon von weitem erkennbare Charaktere von Gestaltproblemen hin und sind doch schon durch ihre Zahl sichere Wegzeichen. Denn wenn wir Gebiete der Physik angeben können, auf welche uns mehrere der Hinweise übereinstimmend aufmerksam machen, so dürfen wir die betreffenden Gebilde unbesorgt als Gestalten ansprechen; die genauere sachliche Prüfung bleibt uns dann immer noch als Sicherung.

Wegzeichen sollen freilich keine Kriterien sein, die etwa zu einer Definition taugten. So könnte es z. B. einzelne Strukturen geben, welche ihrer besonderen Materialnatur wegen leicht als solche experimentell zu untersuchen wären, auf welche also der Hinweis B. gar nicht zuträfe. Aber da es sich zunächst nicht um eine Systematik der Gestalten und ihrer Eigenschaften handelt, so wird mit den angegebenen Gesichtspunkten heuristisch genug geleistet. — In dieser Beziehung am wertvollsten sind die drei Hinweise mathematisch-methodologischer Art. Denn wo in der Physik die theoretischen Aufgaben auf partielle Differentialgleichungen, auf Integralgleichungen und auf Systeme simultaner algebraischer Gleichungen führen, das ist wirklich ohne jede Mühe festzustellen.

82. Die partiellen Differentialgleichungen der mathematischen Physik geben sogar ein viel bestimmteres Wegzeichen für das Suchen nach Gestalten ab, als man im voraus schon erwarten könnte. Da die Aufgaben materiell gänzlich verschiedener Gebiete in partiellen Differentialgleichungen formuliert werden, so wäre das Auftreten auch ganz verschiedener Formen von solchen, je nach dem Gebiet, nichts Überraschendes. In Wirklichkeit sind die meisten partiellen Differentialgleichungen der Physik, welche keine Derivierte nach der Zeit enthalten, entweder identisch mit der Laplaceschen Gleichung

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} = 0,$$

oder aber sie wirken wie Variationen über dieses eine Thema, vielleicht besser, wie Erweiterungen, Verallgemeinerungen der einfachen und häufigsten Form $\Delta V = 0$ [1]). Im schon behandelten

[1]) Auch die Behandlung der erweiterten Gleichung behält eine unverkennbare Ähnlichkeit mit der der einfachen Form $\Delta V = 0$. Vgl. hierzu Goursat, a. a. O. III, S. 224 ff.

Fall war V das Potential des ruhenden elektrischen Feldes. Bei einer ganzen Reihe von theoretischen Fragestellungen tritt nur für das elektrostatische Potential eine Größe anderer „Materialart" ein, während zugleich die Form der Gleichung genau dieselbe bleibt, und ihre Lösung (V als Funktion der Raumkoordinaten) an Begrenzungen vorgeschriebener Raumgebiete bestimmte Bedingungen erfüllen soll. Diese Übereinstimmung der theoretischen Problemformulierung in einander dem „Material" nach vielfach gänzlich fremden Bereichen der Naturwissenschaften hat seit langem die Aufmerksamkeit der Physiker auf sich gezogen. So bemerkt Maxwell einmal, und zwar fast im gleichen Zusammenhang: „In vielen Teilen der Physik werden Gleichungen derselben Form anwendbar gefunden auf Phänomene, welche sicherlich von ganz verschiedener Natur sind, wie z. B. auf die Polarisation in Nichtleitern, auf die Strombildung durch Leiter und auf die Magnetisierung ... Wenn ein Problem für eines dieser Untersuchungsgebiete gelöst ist, so kann das Problem mitsamt der Lösung in die Sprache der anderen Gebiete übertragen werden, und die Resultate in ihrer neuen Form werden noch immer richtig sein" [1]). In neuerer Zeit hat vor allem H. Poincaré die enge Verwandtschaft gerade der partiellen Differentialgleichungen in den allerverschiedensten Gebieten betont und an Beispielen deutlich gemacht [2]). Halten wir uns nur an Fälle, in denen die Aufgabe eine Lösung der Laplaceschen Gleichung verlangt, so ergibt sich schon die folgende Reihe:

83. a) Die Magnetisierung von Körpern ohne remanenten Magnetismus, wenn permanente Magnete auf sie einwirken. Die gesuchte Funktion V ist das magnetische Potential im gesamten ruhenden Felde, also auch im Innern jener Körper. Die Grenzbedingungen schreiben die Form jener Körper, die Lage usw. der permanenten Magnete, zugleich eine Beziehung zwischen den Feldstärken an der gemeinsamen Oberfläche von Körpern verschiedener Permeabilität vor.

Es scheint jedoch, daß das Problem in diesem Fall noch nicht mit der Schärfe und Wirklichkeitsnähe zu behandeln ist wie das elektrostatische. Hätten wir ferner schon hier eine systematische Untersuchung der physikalischen Gestalten zu leisten, so würden wir einen bemerkenswerten Unterschied zwischen dem Magnetisierungsproblem und den im vorigen Abschnitt besprochenen Strukturfragen darin finden, daß die permanenten Magnete als unveränderliche Kraftträger angesehen werden, welche zu den Bedingungen der entstehenden Struktur gehören. Immerhin gibt es (hier nicht berücksichtigte) Fragestellungen für elektrostatische Felder, die dem Magnetisierungsproblem verwandter sind (vgl. die Influenz unverschiebbarer, in Punkten konzentrierter Ladungen auf Leiter in ihrer Nähe).

---

[1]) A. a. O. I, S. 70. Vgl. z. B. auch a. a. O. I, S. 364; II, S. 54.
[2]) Vgl. Chwolson, a. a. O. IV, S. 128 ff.

b) Die Gleichgewichtslage einer Membran, welche über eine feste (wenig von der Ebene abweichende) Raumkurve ringsum gleichförmig aufgespannt ist. V ist in diesem Fall die Ordinate der Membranfläche über der Projektionsebene; in der um eine Derivierte ärmeren Differentialgleichung

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} = 0$$

bedeuten x und y die Raumkoordinaten dieser Ebene, und die vorgeschriebenen Ordinaten der Membran am Rande stellen die Grenzbedingungen dar [1]).

Andere Aufgaben der Elastizitätstheorie führen auf etwas erweiterte Formen der Differentialgleichung [2]).

c) Die stationäre Wärmeströmung in Platten oder dreidimensional ausgedehnten Körpern. V ist die Temperatur, deren Ausbreitung im stationären Zustand als harmonische Funktion zu ermitteln ist, wenn an der Grenze des Körpers vorgeschriebene Randtemperaturen bestehen.

Sind nur zwei Raumkoordinaten zu berücksichtigen, so kommt dieses Problem dem vorigen theoretisch außerordentlich nahe, obwohl es sich dort um ein Gleichgewicht und hier um ein Geschehen handelt, außerdem dem „Material" nach kaum größere Unterschiede in der Physik zu finden sein dürften.

d) Die stationäre Diffusionsströmung gelöster Substanz in einem Lösungsmittel, an dessen Grenzen die Konzentration vorgeschriebene Werte behält oder das Konzentrationsgefälle als Raumfunktion bekannt ist. V bedeutet die Konzentration.

„So verschieden also an sich auch dem Wesen nach der Wärmefluß von der Diffusion ist, in der rechnerischen Behandlung unterliegen Konzentration und Temperatur genau denselben Gleichungen [3])".

e) Die stationäre elektrische Strömung in leitenden Platten oder dreidimensional ausgedehnten leitenden Körpern. V ist das elektrostatische Potential, welches als harmonische Funktion innerhalb des leitenden Raumgebietes bestimmt werden soll, während an Grenzflächen $\frac{\partial V}{\partial n}$ vorgeschrieben ist, oder die Grenzen zum Teil als Niveauflächen zu gelten haben.

---

[1]) Vgl. Riemann-Weber, Die partiellen Differentialgl. (5. Aufl.) II, S. 261 ff.

[2]) Dieselbe Form aber auch wieder bei der Torsion zylindrischer Stäbe (Riemann-Weber, a. a. O. II, S. 173 ff.).

[3]) Nernst u. Schoenflies, Einführung in die mathematische Behandlung usw. (7. Aufl.), S. 379.

Die theoretische Aufgabe ist vielfach identisch mit der Bestimmung elektrostatischer Felder in Nichtleitern; auch gegenüber c) und d) weist das Problem stationärer elektrischer Stromausbreitung keine wesentlichen Unterschiede auf.

f) Mehrere hydrodynamische Strömungsprobleme. Als Beispiel kann die Aufgabe dienen, die stationäre Bewegung einer Flüssigkeit in einem sehr weit ausgedehnten Strömungsfeld zu ermitteln, wenn ein starrer Körper vorgeschriebener Form als Hindernis in diesem Feld fixiert ist. V hat die Bedeutung eines Geschwindigkeitspotentials. In weiter Ferne ist die Geschwindigkeit nach Betrag und Richtung gegeben, unmittelbar am Hindernis und senkrecht zu ihm muß sie Null sein.

„Dies Problem ist mathematisch mit dem elektrischen Problem identisch, daß ein nichtleitender Körper in einem konstanten elektrischen Stromfelde liegt“ [1]), d. h. mit einer besonderen Form der Aufgabe e).

Außer dem elektrostatischen Fall betreffen nur die beiden ersten von diesen Beispielen Zustände der Ruhe, alle übrigen stellen Zustände stationären Geschehens dar, und wenn die höchst auffallende Übereinstimmung der mathematischen Aufgaben einen zuverlässigen Wegweiser bedeutet, dann sind wir hiermit um einen wesentlichen Schritt in der Erkenntnis physikalischer Gestalten vorangekommen.

84. Der Wert des Hinweises läßt sich sogleich dadurch prüfen, daß wir fragen, wo die Methode der Integralgleichungen auf Probleme der theoretischen Physik anwendbar ist. Sie wurde bereits in der kurzen Zeit ihrer Entwickelung übertragen auf die Probleme der Magnetisierung, der elastischen Gleichgewichte, der Wärmeströmung, der hydrodynamischen Strömungen, außerdem auf mehrere Probleme periodisch-stationären und eigentlich dynamischen Charakters, die wir noch nicht behandeln. Bei der vollkommenen Analogie, welche die genannten Beispiele in mathematischer und allgemein-gedanklicher Hinsicht mit den übrigen Fällen der oben gegebenen Zusammenstellung aufweisen, unterliegt es gar keinem Zweifel, daß überall, wo die Laplacesche Differentialgleichung Ausdruck des physikalischen Problems ist, auch die Methode der Integralgleichungen angewendet werden kann.

In allen diesen Fällen läßt sich also die mathematische Fragestellung formal durch einen Grenzübergang von simultanen algebraischen Gleichungen her ableiten. Damit scheiden diese selbst für die gegenwärtige Betrachtung aus, wie ja auch die Differentialgleichung Problemausdruck für stetige und unmittelbar formabhängige Gebilde ist. Wenn es sich überhaupt um Gestalten handelt, so liegen deshalb starke Gestalten und stetige Raumstrukturen vor.

[1]) Riemann-Weber, a. a. O. II, S. 438.

85. Dadurch, daß immer dieselbe Gleichung $\Delta V = 0$ in einem Raumgebiet und bei gegebenen Bedingungen an dessen Grenzen zu lösen ist, wird die weitere Kontrolle sehr vereinfacht. Wenn es auffällig war, daß die eine Gleichung (oder das Coulombsche Gesetz) für eine unendliche Mannigfaltigkeit von elektrostatischen Problemen eindeutig bestimmte Lösungen ergeben mußte und die theoretische Bestimmung von elektrostatischen Strukturen dadurch fast wie apriorisch wirkte, so wiederholt sich dieser Eindruck in den neuen Anwendungsfällen, insofern trotz der etwas abweichenden Art der Grenzbedingungen für unzählige Fälle vorgeschriebener Raumformen (und Randwerte) die Lösung denknotwendig ist. Man hat freilich zu prüfen, ob die Problemformulierung jedesmal schon ganz korrekt ist; denn in ihr liegt ja zusammengefaßt, was an fundamentalen Erfahrungen auf jedem Gebiet der theoretischen Bestimmung natürlich doch zugrunde liegt. Aber stärkere Bedenken bestehen da nur für das recht komplexe Magnetisierungsproblem; allenfalls könnte noch bei Wärmeleitung und Diffusion das Auftreten sehr großer Temperatur- und Konzentrationsunterschiede zu Erscheinungen führen, denen der einfachste Problemausdruck nicht gerecht würde.

86. Andrerseits wirkt diese Art theoretischer Aufgaben und Lösungen als noch viel bemerkenswerter, wo es nunmehr nicht allein die gewaltige Zahl möglicher elektrostatischer Strukturen, sondern eine Vielheit solcher Mannigfaltigkeiten aus grundverschiedenen Bereichen der Physik ist, welche einem und demselben Differentialgesetz folgen und unter Grenzbedingungen etwas variierender Art in ganz verwandter Weise mathematisch zu ermitteln sind. Man muß annehmen, daß die eine ständig wiederkehrende Gleichung trotz der extremen Materialverschiedenheit der aufgezählten physikalischen Zustände und Geschehensarten etwas ihnen allen physisch Gemeinsames bestimmt. Die Lösungen sollen in allen jenen Gebieten der Physik harmonische Funktionen sein. Welche generelle Bedeutung kommt dieser Art Funktionen für die zeitlich konstanten, stetig ausgebreiteten Gesamtgebilde, wie es scheint, fast der ganzen Physik zu?

Diese Frage ist um so berechtigter, als bei der Lösung der erweiterten Differentialgleichung (z. B. in der Elastizitätslehre) die Bestimmung harmonischer Funktionen noch immer von wesentlicher Bedeutung bleibt [1]).

87. Wenn die harmonischen Funktionen eine so universale Wichtigkeit gewissermaßen über allen unterscheidenden Materialmerkmalen in den einzelnen physikalischen Gebieten besitzen und also, nachdem die Probleme einmal erfahrungsgemäß gestellt sind,

[1]) Heywood u. Fréchet, L'équation de Fredholm usw., S. 17 f., 20.

im übrigen ohne weiteren Rekurs auf die Erfahrung ermittelt werden können, dann wird diese rein mathematische Aufgabe damit wieder nicht zu einer leichten Anforderung. Je nach der Art der Grenzbedingungen schwankt der Schwierigkeitsgrad der Probleme ein wenig, im allgemeinen aber bleibt die Sachlage dieselbe wie in der Elektrostatik: einfachen und in bloßer Anschauung der vorgeschriebenen Formen auf einmal lösbaren Aufgaben stehen solche gegenüber, bei denen das Denken auf allerstärkste Schwierigkeiten stößt, wie sie früher bereits dem Typus nach geschildert wurden. Wir haben jedoch gesehen, daß die Fredholmsche Methode, die Klärung des methodischen und sachlichen Zusammenhangs mit schwachen Gestalten, jene Hindernisse nicht mehr als unüberwindlich erscheinen lassen und jedenfalls einen prinzipiellen Operationsweg deutlich vorzeichnen.

88. Probleme wie die angeführten werden in der Experimentalphysik recht selten untersucht und sind so gut wie ganz Aufgaben der mathematischen Physik geworden. Das liegt wie in der Elektrostatik nicht allein an dem Umstand, daß, abgesehen von der Problemformulierung, irgendwelche notwendige Denkverfahren die Lösung müssen ergeben können. Auch die Mehrzahl der nun betrachteten Fälle ist einer messenden Analyse wenig zugänglich, und ein Versuch, diese auszuführen, wird in der Regel das zu untersuchende Objekt sogleich störend beeinflussen. Wo dies von den Beispielen a) bis f) gilt, sieht man aus der Natur jener Erscheinungen wohl ohne weiteres. Eine Ausnahme macht das elastische Problem b): die Gleichgewichtslage einer gespannten Membran kann in einfacher optischer Ausmessung und unter Verschärfung dieses Verfahrens mit allen optischen Hilfsmitteln bis zu größter Genauigkeit festgestellt werden, eben weil dieser Fall optisch so besonders günstige Eigenschaften hat (vgl. oben 52 ff.). Manche Beispiele stationären Geschehens lassen wenigstens unter ganz bestimmten Umständen, von denen noch die Rede sein wird, eine ausreichende experimentelle Behandlung zu.

89. Endlich wird das einzige unserer Kriterien, welches sich ganz unmittelbar auf die sachliche Beschaffenheit der gesuchten Gestalten bezieht, von den nach methodologischem Hinweis gefundenen Fällen durchweg erfüllt. Wie in der Elektrostatik handelt es sich überall um die spontane Ausbreitung physischer Größen in einem gegebenen Gesamtgebiet innerhalb gegebener „physischer Formen“ [1]), wiederum nimmt zugleich die Energie des betreffenden

[1]) Im Fall der Membran sind die früher eingeführten Termini richtig folgendermaßen anzuwenden: „Bedingende Form“ ist die feste Randkurve, die spontane Spannungsart der Membran innerhalb der Kurve stellt die Eigenstruktur dar.

Gebildes eine bestimmte, jener Struktur entsprechende Ausbreitung an. Das gilt von der Energie des magnetisierten Gebietes, der elastischen Energie der Membran, der Gesamtenergie, vor allem aber auch der arbeitsfähigen (durch Temperaturdifferenzen gegebenen) Energie des stationär durchströmten „Temperaturfeldes", von der arbeitsfähigen Energie des Diffusionsstromes, wie sie durch das Konzentrationsgefälle bestimmt wird, von der elektromagnetischen Energie einer stationären elektrischen Strömung und der kinetischen Energie des hydrodynamischen Flusses. In manchen Fällen, so dem des elektrischen Stromes, ist überdies auf noch andere von der räumlichen Ausbreitung abhängige Energieprobleme zu achten, vorzüglich auch solche der Energieumwandlung.

90. Daß es sich wirklich um Strukturen handelt, nicht um Verteilungen, läßt sich wie auf elektrostatischem Gebiet auch für alle diese Fälle leicht zeigen. Man hat vor allem zu prüfen, ob bei konstanter bedingender Form oder Topographie die stetig ausgebreiteten Gebilde in Ruhe und im stationären Zustand eine beliebige lokale Änderung zulassen, ohne daß das Gesamtsystem darauf mit einer Verschiebung durchweg reagiert. Tritt eine solche Verschiebung auf den Eingriff hin mit größerer oder geringerer Heftigkeit ein, so bestand zuvor eine Struktur, deren Momente einander durch das ganze Gebilde trugen, keine selbständigen „Teile" in dem Ganzen waren. Dieses Ganze blieb zuvor erhalten, nicht aus Unveränderlichkeit der Momente an und für sich und einzeln genommen, sondern weil ihre Gesamtheit sich spontan als ein stabiler Komplex für die gegebenen Bedingungen ausgebildet hatte. In einem der Fälle soll weiterhin der Gestaltcharakter noch einmal genauer aufgewiesen werden, damit der konkrete Sinn des Behaupteten nicht wieder verloren gehe; doch sehen wir bereits vor dieser Betrachtung im einzelnen die Gestaltnatur der aufgezählten Beispiele als unfraglich an.

91. In der mathematischen Physik werden Probleme vom Typus der angeführten Fälle seit geraumer Zeit unter zwei Namen zusammengefaßt. Die Aufgabe, eine Lösung der Gleichung $\Delta V = 0$ zu finden, wenn die Werte von V am Rande (an der Oberfläche) des betreffenden Raumgebietes gegeben sind, wird das Dirichlet-Problem genannt. Die Aufgabe, eben jene Gleichung für vorgeschriebene physische Formen zu lösen, oder — was dasselbe ist — eine harmonische Funktion für die Formen zu finden, wenn an der Begrenzung die Werte von $\frac{\partial V}{\partial n}$ bekannt sind, heißt das Neumann-Problem. Beide Aufgaben sind einander nahe verwandt; auch lassen sich Kombinationen der beiden Arten von Grenzbedingungen für ein Problem aufstellen, für welche wir keinen

besonderen Namen einführen. Als Beispiel für das Dirichlet-Problem kann der Fall der Wärmeleitung (oder die elektrostatische Struktur) dienen, die Ausbreitung stationärer elektrischer Ströme führt auf das Neumann-Problem oder eine Mischform. — Diese berühmten Aufgaben der mathematischen Theorie sind also stets auf die quantitative Ermittelung eben jener Art von Gebilden gerichtet, deren Natur erst später durch von Ehrenfels ein Problem auch der Psychologie wurde. Das Dirichlet- und das Neumann-Problem gehen auf physikalische Gestalten.

Integralgleichungen haben wir für den Ausdruck von Gestaltaufgaben angesehen. Die erste Mitteilung Fredholms über seine Entdeckungen führt den Titel „Über eine neue Methode zur Lösung des Dirichlet-Problems".

92. Die oben bereits aufgeworfene Frage, welches die universale Bedeutung der harmonischen Funktionen in so vielen Gebieten der Physik sei, läßt sich in diesem Zusammenhang noch nicht ganz scharf beantworten. Da alle harmonischen Funktionen Lösungen der Differentialgleichung $\Delta V = 0$ sind, so kann man ebensogut fragen, ob denn diese Gleichung nicht einen allen Anwendungsfällen gemeinsamen und anschaulich faßbaren Sinn habe. Das wird sich vollständig erst entscheiden, wenn später auch die Differentialgleichungen dynamischen und periodisch-stationären Geschehens zu untersuchen sind, in denen wieder der Ausdruck ΔV vorkommt. Vorläufig kann man zweierlei von der Bedeutung der harmonischen Funktionen sagen:

I. Handelt es sich um ein stationäres Geschehen in bestimmter räumlicher Ausbreitung, so ist die Gültigkeit der Laplaceschen Gleichung in dem betrachteten Raumgebiet nach Gauß gleichbedeutend damit, daß in jenem Gebiet und jedem beliebigen seiner Teilbereiche die Gleichung besteht:

$$\int\int \frac{\partial V}{\partial n}\, dS = 0;$$

hier ist dS das Element der Grenzfläche irgendeines dieser Bereiche, $\frac{\partial V}{\partial n}$ die Ableitung der harmonischen Funktion an der Fläche und in Richtung etwa stets der inneren Normalen, und die Integration wird über die ganze geschlossene Fläche erstreckt[1]). Diese Gleichung kann als Äquivalent des Differentialgesetzes angesehen

[1]) Bei der Ableitung der Integralgleichung wird übrigens sofort klar, daß in ihr das Coulombsche Gesetz steckt, daß also für zeitunabhängige Gebilde der Einfluß eines Punktes auf andere mit dem Quadrat der Entfernung in dreidimensionalen Fällen und mit der Entfernung in zweidimensionalen Problemen abnimmt.

werden. Nun ist aber in jedem Fall einer stationären Strömung das Integral Ausdruck für die gesamte Strömung (ihr proportional), welche in das betreffende Gebiet einfließt oder (bei umgekehrtem Vorzeichen) das Gebiet verläßt. Also besagt die Gleichung einfach, daß im ganzen derselbe Strömungsbetrag durch die geschlossene Oberfläche eindringt, wie durch sie wieder nach außen abfließt, so daß die Gesamtwirkungen des Geschehens sich in jedem betrachteten Bereich aufheben und der Zustand im ganzen Gebiet fortwährend derselbe bleibt. Wir können auch sagen, daß für alle stationären Zustände jene Gleichung als Integralbedingung das folgende verlangt: die Funktion V, Ausdruck der Struktur im Raume, soll durch das ganze Gebiet hin stets so beschaffen sein, daß das stationäre „Sich-Erhalten" des Geschehens durch seine eigene Ausbreitungsart garantiert wird. Für stationäres Geschehen ist damit die Laplacesche Gleichung sehr allgemein und gewissermaßen anschaulich als Gesetz der zeitunabhängigen stetigen Raumstruktur erkannt.

Diese Deutung läßt sich bildlich, aber nicht in realem Sinn auf die Ruhezustände übertragen, deren Struktur ebenfalls durch harmonische Funktionen anzugeben ist, und deshalb leistet diese Auffassung noch nicht, daß wir den Sinn der Gleichung $\Delta V = 0$ überall aus einem einzigen Gedanken verstehen, wo immer dieses Gesetz als Gestaltbedingung auftritt. — Der Zusammenhang mit der Poissonschen Gleichung, als deren Reduktion die Bedingung $\Delta V = 0$ bei elektrostatischen und magnetischen Strukturen erscheint, gibt wenigstens für einen ersten Blick auch keine allgemeine Aufklärung.

II. Man kann ferner versuchen, trotz der Verschiedenheit der physikalischen Gebiete, für deren starke zeitlose Gestalten dieselbe Differentialgleichung gilt, eine in allen wiederkehrende physische Größe mit dem Sinn des gemeinsamen Gesetzes in Beziehung zu bringen. Eine solche Größe, die trotz der größten Materialunterschiede im übrigen doch überall in die Strukturen eingeht, ist die Energie. Und in der Tat läßt sich ein allgemeines Gesetz für das räumliche Verhalten der Energie in sämtlichen zeitunabhängigen Gestalten angeben: Gewisse Energiegrößen werden, für die gesamte Struktur berechnet, gerade dann kleiner als in jedem anderen Fall, wenn die spezifische Ausbreitungsart unter Erfüllung der vorgeschriebenen Grenzbedingungen eben durch eine harmonische Funktion gegeben ist. Es besteht also wirklich der erwartete Zusammenhang mit der für alle jene Strukturen maßgebenden Differentialgleichung. Und als Energiebedingung angesehen, welcher solche zeitlosen Strukturen durch ihre spezifische Ausbreitungsart genügen, behält die Forderung nach harmonischen Funktionen in allen Anwendungsfällen und auf den verschiedensten Gebieten der Physik immer gleiche Bedeutung. Dieser kurze Hinweis muß für

eben genügen. Wir kommen jedoch später auf die fundamentale Eigenschaft der aufgezählten zeitunabhängigen Gestalten zurück, gerade bei ihrer harmonischen Struktur bestimmte Energiebeträge für das Gesamtgebilde auf ein Minimum zu bringen [1]).

Zweites Kapitel.

Die schwachen Gestalten.

93. Das Aufsuchen schwacher physikalischer Gestalten kann geschehen, entweder indem man prüft, welche von den gefundenen starken Strukturen eine Reduktion auf schwache Gestalten zulassen, oder indem man wiederum methodologisch und ohne Rücksicht auf das eben Festgestellte vorgeht. Wir schlagen den zweiten Weg ein und fragen, wo in der Physik Systeme simultaner algebraischer Gleichungen Problemausdruck sind. Damit kommen wir zu Erscheinungen, die auch aus der Experimentalphysik jedermann gut bekannt sind, und so würden vielleicht manche der folgenden Beispiele etwas trivial erscheinen, wenn nicht der sachliche und theoretische Zusammenhang mit starken Gestalten dazu veranlaßte, die Natur der gewohnten Tatsachen mit neuem Interesse zu betrachten. Da für die theoretische Bestimmung schwacher Gestalten im allgemeinen höhere Mathematik nicht erforderlich ist, so kann das rechnerische Verfahren hier wie bei den schwachen elektrostatischen Gestalten ohne jede Mühe verstanden werden.

a) **94.** Eine Gruppe von Körpern sei zu einem kompakten System vereinigt. Nachdem dieses System zu Beginn eine gleichmäßige (und niedrige) Temperatur gehabt hat, wird ihm in einem gegebenen Moment irgendwie eine Wärmemenge Q zugeführt und darauf als äußere Begrenzung eine praktisch für Wärme (und Strahlung) undurchlässige Wand ringsum angebracht. Die Wärmemenge soll nicht dazu ausreichen, merkliche Vergrößerungen der Volumina, Änderungen der Aggregatzustände oder auch nur der spezifischen Wärmen zu bewirken. Haben wir es mit p Körpern und ihnen entsprechend mit den Wärmekapazitäten C_1, C_2, ... C_n, ... C_p zu tun, so verbreitet sich die Wärmeenergie im Innern des Systems derart, daß die Temperatursteigerung t (von der gleichen Anfangstemperatur aus) überall dieselbe und für den n-ten Körper

$$t = \frac{Q_n}{C_n}$$

---

[1]) Vgl. unten Abschnitt IV, 5. Kapitel.

ist, wo Q_n die unbekannte Wärmemenge bedeutet, welche der Körper dabei aufnimmt. Es ergibt sich das System von Gleichungen:

$$\frac{Q_1}{C_1} = \frac{Q_2}{C_2} = \cdots = \frac{Q_n}{C_n} = \cdots = \frac{Q_p}{C_p},$$

und das Gesetz von der Erhaltung der Energie fordert nach den angegebenen Voraussetzungen noch

$$\sum_1^p Q_n = Q.$$

Auf den n-ten Körper entfällt hiernach die Wärmezunahme

$$Q_n = \frac{Q \cdot C_n}{C_1 + C_2 + \cdots C_n + \cdots C_p},$$

und dieser Ausdruck ist vollkommen analog demjenigen, welcher für eine schwache elektrostatische Gestalt das Gesamtmoment auf einem Leiter angab. Von jenem Beispiel her sind uns also die Gestalteigenschaften auch des jetzt betrachteten Gebildes schon bekannt, wir sehen wieder das Moment für jeden Körper von den Kapazitäten auch aller übrigen abhängig, aber nicht von den absoluten Kapazitäten, sondern von ihren Verhältnissen (zweites Ehrenfels-Kriterium) usw. Nur in einem Punkt besteht ein Unterschied: Die elektrostatischen Kapazitäten von Leitern bestimmen sich unmittelbar nach den Eigenstrukturen auf ihnen und also nach den Formen der Leiter; für eine Wärmekapazität C_n dagegen gilt die Beziehung

$$C_n = M_n c_n,$$

wo M_n die Masse des n-ten Körpers, c_n die spezifische Wärme seines Materials in dem Temperaturbereich der Untersuchung bedeutet. Beide Faktoren haben mit der Form des Körpers nichts zu tun, und wir sehen, daß die Wärmekapazitäten unabhängig von Formen sind. Während also die schwache elektrostatische Gestalt eine Gruppe von starken Strukturen in sich schloß, gibt es dergleichen im vorliegenden Falle nicht, sondern das Innere eines jeden der Körper enthält wieder überall der Masse schlechthin proportionale Momente. Erst eine molekular- und atomtheoretische Betrachtung würde in allerkleinsten Räumen wieder auf Formprobleme stoßen. Wärme als solche, makroskopisch genommen, ergibt, weil sie „ungeordnete Energie“ ist, keine starken Gestalten.

Den einfachsten Fall einer schwachen Wärmegestalt haben wir früher (Abschnitt I, 33) bereits auf andere Weise kurz behandelt; wir haben schon damals gesehen, was die Psychologie und Biologie mitunter verkennen; die Gesetze, welche in einem geschlossenen System gelten, betreffen dieses als Ganzes, und nach den Bedingungen für dieses Ganze bildet sich der Zustand (die Momente) im einzelnen aus. In dem früheren Zusammenhange wurde auch

erwähnt, daß die Entropie ein Maximum ist, wenn in solchen Systemen die Wärmeenergie keine Verschiebungen mehr erfährt. Die Analogie zu dem oben angeführten Minimalprinzip für Gestalten gerichteter Energie ist deutlich.

b) **95.** Das Verhalten der Wärme in solchen Fällen wird ein wesentlicher Anlaß zu der alten thermodynamischen Materialtheorie gewesen sein, nach welcher Wärme ein unzerstörbares, aber auch unwägbares Fluidum sein sollte. Nachdem sich gezeigt hatte, daß Wärme als Wärme sehr wohl verschwinden und geschaffen werden kann, also ein Erhaltungssatz nicht im Sinne der alten Anschauung, sondern nur für die größere Gruppe der Energien überhaupt besteht, mußte jene Anschauung weichen. Trotzdem bleibt es dabei, daß die Wärmeenergie sich in einem isolierten (nicht strahlenden) System, in welchem eine Energietransformation ausgeschlossen ist, ebenso verbreitet wie eine Flüssigkeit in einer Anzahl von untereinander kommunizierenden Gefäßen. Umgekehrt führt der letztere Fall (der vielleicht noch in die Physik des Alltagslebens gehört) auf genau die gleiche Berechnungsart, hat also ebensogut schwache Gestalteigenschaften. Lassen wir in der Tat eine Anzahl Hohlzylinder, die verschiedene Querschnitte $S_1, S_2, \dots S_n, \dots S_p$ haben und auf ebener Fläche stehen mögen, unten durch kurze, enge, als Volumina zu vernachlässigende Rohre verbunden sein, so ist die Bedingung des spontan eintretenden Ruhezustandes, daß überall das Flüssigkeitsniveau in einer und derselben Äquipotentialfläche der Gravitation, also in dem (für beschränkte Ausdehnungen) homogenen Gravitationsfeld in einer horizontalen Ebene liegt. Für die Flüssigkeitsmasse M_n, welche beim Druckausgleich in das n-te Gefäß eingeströmt ist, findet man

$$M_n = \varrho \,.\, S_n \,.\, h,$$

wenn ϱ die Dichte, h die (unbekannte) Höhe des Flüssigkeitsspiegels bedeutet, und das System von bestimmenden Gleichungen wird:

$$\frac{M_1}{S_1} = \frac{M_2}{S_2} = \cdots = \frac{M_n}{S_n} = \cdots = \frac{M_p}{S_p},$$

mit $\sum_1^p M_n = M$ (Gesetz der Erhaltung der Masse). Also folgt:

$$M_n = \frac{M \,.\, S_n}{S_1 + S_2 \cdots S_n + \cdots + S_p}.$$

Die Größen S_n (Querschnitte) treten hier als Kapazitäten in anschaulicher Bedeutung auf. Daß keine Verteilung vorliegt, sondern eine Gestalt, ist wieder sofort zu ersehen; jede leichte Änderung an einer Stelle verschiebt das ganze Gebilde usw. Die potentielle Energie ist sichtlich ein Minimum in dem beschriebenen Zustand.

c) **96.** Die bekannteste Anwendung simultaner Gleichungen auf physische Systeme stellen die Kirchhoffschen Regeln dar, welche die Intensitäten stationärer elektrischer Ströme in beliebig verzweigten Bahnen zu berechnen erlauben, wenn es nur möglich ist, für jeden Stromzweig eine ihn allein charakterisierende Größe, seine Leitfähigkeit oder seinen Widerstand, anzugeben. In einfachen Fällen nehmen dabei die Bedingungen dieselbe rechnerische Form an wie in den vorigen Beispielen. Teilt sich zwischen zwei Punkten a und b der Strombahn die Leitung in p Zweige mit den Leitfähigkeiten $L_1, L_2, \ldots L_n, \ldots L_p$ und ohne innere elektromotorische Kräfte, so ist die Stromintensität J_n im n-ten Zweig:

$$J_n = L_n (V_a - V_b),$$

und das System von simultanen Gleichungen wird:

$$J_1 : J_2 : \ldots : J_n : \ldots J_p = L_1 : L_2 : \ldots L_n : \ldots : L_p$$

mit:

$$J_1 + J_2 + \cdots J_n + \cdots + J_p = J.$$

Hier ist J die Gesamtströmung im leitenden System, welche aber in diesem Falle von den Eigenschaften des untersuchten Gebietes selbst mitbestimmt wird. Für den n-ten Zweig ergibt sich:

$$J_n = J \cdot \frac{L_n}{L_1 + L_2 + \cdots L_n + \cdots + L_p}.$$

Wenn E die elektromotorische Kraft ist, welche außerhalb der Verzweigung im Stromkreise liegt, und L die gesamte Leitfähigkeit außerhalb des verzweigten Gebietes, so kann man noch den Gesamtstrom (gemeinsamen Koeffizienten J aller J_n) ausdrücken durch:

$$\frac{EL \sum_1^p L_n}{L + \sum_1^p L_n}.$$

Die Rechnung für das stationäre Geschehen verhält sich in einem solchen Falle fast wie die für schwache ruhende Gestalten. Man kann ferner leicht zeigen, daß nach dem angegebenen Gesetz die Strömungsenergie, für das ganze System berechnet, einen kleineren Wert hat als bei jeder anderen Strömungsart [1]). In den einzelnen Stromzweigen bestehen in diesem Falle starke Gestalten, d. h. die Leitfähigkeit hängt von der Form der einzelnen Strombahnen ab, es gibt eine Strömungsstruktur in den einzelnen Bahnen. Wie bei den schwachen elektrostatischen Gestalten müssen deshalb besondere Bedingungen erfüllt sein, wenn es möglich sein soll, von der Leitfähigkeit eines Zweiges für sich als einer Kon-

[1]) Vgl. unten 252.

stanten eben dieses leitenden Teiles zu sprechen, welche nicht von den Formen auch der übrigen Zweige mitbestimmt wird. (Elektrostatisches Analogon: Kapazität eines von mehreren verbundenen Leitern für sich.) Unabhängigkeit der Strukturen in Einzelzweigen von den Formen der übrigen Zweige wird z. B. erreicht, wenn die einzelnen Zweige sich nur in eng begrenzten Flächen („Punkten") berühren; dann haben sie praktisch von den anderen Formen unabhängige Leitfähigkeiten, und man kann wie oben die Gesamtmomente der schwachen Gestalt einfach berechnen. Dringt der Formeinfluß von einem Zweige merklich in alle anderen und umgekehrt, so führt der Ausdruck „Leitfähigkeit eines Zweiges" leicht irre; denn die Struktur des ganzen leitenden Gebietes muß als ein stetiges Gebilde gemäß der ganzen Form ermittelt werden (starke Gestalt e des vorigen Abschnittes).

97. Am stationären elektrischen Strome wird der Gestaltcharakter rechnerisch ebenfalls deutlich, wenn man das Potentialgefälle in einem einfachen Stromkreise bestimmt. Besteht nämlich die ganze geschlossene Leitung aus p hintereinandergeschalteten Leitern mit den (als selbständige Konstanten vorausgesetzten) Widerständen $W_1, W_2, \dots W_n, \dots W_p$, und ist die elektromotorische Kraft im ganzen E, so wird die Potentialdifferenz zwischen den Enden des Widerstandes W_n nach Ohm:

$$\Delta V_n = E \cdot \frac{W_n}{W_1 + \cdots W_n + \cdots + W_p}.$$

Diese Gleichung gilt, solange im Leiterteil vom Widerstand W_n keine elektromotorische Kraft besteht; demgemäß ist die Einteilung des Systems in Leiterstücke vorzunehmen. Die Potentialdifferenz zwischen den Enden des n-ten Leiters hängt von allen Widerständen ab, und zwar unter Erfüllung des zweiten Ehrenfels-Kriteriums.

d) **98.** Nach dem Bilde einer verzweigten elektrischen Strömung kann man leicht verwandte schwache Gestalten auf den Gebieten der Wärmeströmung, der Diffusion und des hydrodynamischen Flusses finden, deren rechnerische Behandlung überall den schon besprochenen Beispielen zu ähnlich ausfällt, als daß wir noch darauf einzugehen brauchten.

e) **99.** Die simultanen Gleichungen werden schon für manche Stromverzweigungen sehr viel komplexer. Andere und weniger einfache Ausdrücke ergeben sich auch vielfach auf einem Gebiete, dessen unübersehbare Problemmannigfaltigkeit ebenfalls in Systemen algebraischer Gleichungen behandelt wird: der physikalischen Chemie. Hier handelt es sich vielfach gar nicht um eine Ausbreitung von Material oder Geschehen auf räumlich ausgedehnte Bereiche, sondern um qualitative Gruppierung von Stoffen in Gemischen. Überlegen wir z. B. [nach Planck[1])], wie sich in verdünnter

[1]) Thermodynamik, 3. Aufl., § 263.

wässriger Lösung Schwefelsäure quantitativ verhält, wenn also außer der ganz überwiegenden Zahl von Molekülen des Lösungsmittels das unzersetzte Molekül H_2SO_4, sowie in doppelter Ionenspaltung sowohl $\overset{+}{H}$ und $H\overset{-}{S}O_4$, wie $\overset{+}{H}$ und $\overset{-}{S}\overset{-}{O}_4$ auftritt. Der zweite Hauptsatz der Thermodynamik, den wir schon früher als ein Theorem über spontane Gruppierungen von Materie und Energie erwähnt haben, gibt für die Konzentrationen der erwähnten Molekülarten (in gleicher Folge benannt) die Beziehungen:

$$\frac{c_2 c_3}{c_1} = K \quad \text{und} \quad \frac{c_2 c_4}{c_3} = K',$$

wo K und K' die (nur von Temperatur und Druck abhängigen) Konstanten der beiden Dissoziationsvorgänge sind. Da außerdem die Zahl der SO_4-Radikale halb so groß sein muß wie die der H-Atome, so kommt hinzu:

$$c_2 = c_3 + 2c_4,$$

und die Erhaltung der Masse verlangt, wenn c der gegebene Gesamtbetrag gelöster Schwefelsäure ist,

$$c = c_1 + c_3 + c_4.$$

So ergeben sich für die vier Unbekannten vier Gleichungen. Man sieht sogleich, daß mit der veränderten Problemart die Form der Rechnung sich etwas modifiziert; diese schwache Gestalt hat eben nicht alle Eigenschaften mit den bisher erwähnten gemein. Der wesentliche Gesichtspunkt aber findet sich auch hier wieder: Im Gleichgewicht für gegebene Temperatur und gegebenen Druck erhalten sich die reagierenden Stoffe gegenseitig auf bestimmten Konzentrationen, Veränderung einer Konzentration führt zu chemischer Verschiebung durchweg. Die Thermodynamik behandelt ein gewaltiges Gebiet von solchen Problemen der physikalischen Chemie auf dieselbe Weise, also durch Systeme simultaner Gleichungen, welche bestimmen, wann der „Reaktionsdruck", wie man wohl sagen kann, bezüglich jeder möglichen Transformation der gleiche geworden ist, wie für ihre Umkehrung. Wo es gilt, das Verhalten gegebener Substanzmengen (unabhängiger Elemente) in verschiedenen Phasen (im Sinne von Gibbs) zu berechnen, gewinnt die Aufgabe wieder größere Ähnlichkeit mit den zuerst besprochenen schwachen Gestalten. Ein näheres Eingehen auf diese Fälle kommt für uns nicht in Betracht.

100. Ohne Rücksicht auf Raumformen sind Reaktionen nur bei makroskopischer Betrachtung zu behandeln. In kleinsten Räumen von molekularer Größenordnung untersucht, würden die Fragen der physikalischen Chemie wieder auf die Erforschung von

Raumgestalten führen, nämlich die chemischen Elementarstrukturen. Von diesen können wir jetzt nur zweierlei aussagen:

α) Die Fortentwicklung der Physik tendiert nicht dahin, den Gestaltcharakter chemischer Verbindungen zu reduzieren, da ja in der reinen Physik selbst genug Gestalten vorliegen (dies in Rücksicht auf ein Bedenken, welches in der Einleitung erwähnt wurde).

β) Daß chemische Verbindungen stets noch andere Eigenschaften und Wirkungen haben als die Summe ihrer „Teile", verlangt zur Erklärung durchaus nicht transphysikalische Prinzipien; denn die Eigenschaften keiner physikalischen Struktur sind aus artgleichen Eigenschaften von Teilen summativ abzuleiten.

f) **101.** Die im ersten Abschnitt betrachteten elektromotorischen Kräfte zwischen verschiedenen Lösungen sind Äußerungen stationärer schwacher Strömungsgestalten, deren mathematische Behandlung erst an späterer Stelle wiedergegeben werden kann (vgl. unten Abschnitt IV, 3. Kapitel).

102. Bemerkung. Man sieht es den rechnerischen Ausdrücken für ein Gesamtmoment in schwachen Gestalten zumeist unmittelbar an, daß der Zustand (Moment) in einem Gebiet (z. B. einem Stromzweig) von den Eigenschaften (z. B. Leitfähigkeiten) aller übrigen Gebiete mitbestimmt wird. Indessen ist darauf zu achten, daß die mathematische Form

$$\frac{x_n}{x_1 + x_2 + \cdots x_n + \cdots x_p}$$

bisweilen auftreten kann, ohne daß hieraus der Schluß auf Gestaltzusammenhang zwischen den betreffenden Größen gezogen werden dürfte. Das zeigt folgendes Beispiel:

Zwei ideale Gase, die mit den Molzahlen n_1 und n_2 vertreten sind, gleiche Temperatur und gleichen Druck haben, diffundieren ineinander. Nach Ablauf des Vorganges ist die Entropie der Gase gegen die Summe ihrer Entropien vor der Vermischung um

$$-R\left(n_1 ln \frac{n_1}{n_1 + n_2} + n_2 ln \frac{n_2}{n_1 + n_2}\right)$$

gewachsen, wo wir mit R die Gaskonstante, mit ln den natürlichen Logarithmus bezeichnen. Nun wird bisweilen bei der Behandlung von physikalischen Gemischen die allgemeine Formulierung gewählt: Die Vermischung erhöhe die Entropie. Dieser bei idealen Gasen mindestens mehrdeutige Satz scheint in einem naheliegenden, aber falschen Sinn durch den quantitativen Ausdruck der Entropievermehrung bestätigt zu werden: Die beiden additiven Glieder beziehen sich offenbar jedes auf eines der Gase, das erste z. B. auf das Gas mit der Molekülzahl n_1. Aber in diesem Glied tritt auch die Größe n_2 auf, welche ein Maß der zweiten Gasmenge ist, und man könnte versucht sein, nach Analogie mit früheren Fällen genau gleicher Rechnungsform zu meinen, die Entropie jedes Gases nach der Mischung hänge in der Art schwacher Gestalten von dem anderen ab. Wäre dies zutreffend, so dürfte man in der Tat sagen, die Vermischung der idealen Gase steigere ihre Entropie. In Wirklichkeit aber verhalten sich die beiden Gase nach der Mischung jedes, als wäre das andere überhaupt nicht vorhanden, nehmen rein additiv den gleichen Totalraum ein. Die Entropievermehrung hat also

hier mit der Vermischung gar nichts zu tun, sondern nur mit der Ausdehnung, die ein jedes bei der Diffusion durchmacht. Dehnte sich ein jedes von ihnen (ohne Arbeitsleistung) gesondert um den gleichen Betrag aus, wie bei der Diffusion, so wäre die Entropiezunahme beider zusammen genau so groß. Die Verhältnisse $\frac{n_1}{n_1+n_2}$ und $\frac{n_2}{n_1+n_2}$ deuten also durchaus nicht auf ein „Sich-Tragen" der vermischten Gase, sondern nach den Gasgesetzen mißt (n_1+n_2) einfach den Gesamtraum, den jedes Gas unabhängig vom anderen nach der Diffusion einnimmt, n_1 und n_2 die Räume, die jedes vorher erfüllte, und die Brüche geben nur an, in welchem Maßstab sich jedes Gas für sich ausgedehnt hat [1]).

103. Weshalb manche der im vorigen Kapitel erwähnten starken Gestalten nicht auch als schwache Gestalten vorkommen, ergibt sich sofort aus der Natür der betreffenden Erscheinungen, z. B. für die Magnetisierung. Wir haben gesehen, daß außerordentlich vielen makroskopisch schwachen Gestalten kein makroskopischer starker Parallelfall entspricht, weil die Energie der Gebilde „ungeordnet" ist.

Drittes Kapitel.

Die stationären elektrischen Ströme.

104. In den letzten Abschnitten sind Zustände stationären Geschehens als physikalische Gestalten angesehen worden. Da es zunächst vielleicht etwas Überraschendes hat, auf Vorgänge dieselbe Denkweise angewendet zu sehen, wie auf Ruhezustände, so soll wenigstens in einem Falle von stationärem Geschehen genauerer Nachweis erfolgen, wie er früher nur für eine ruhende Gestalt durchgeführt wurde.

Die Beispiele stationären Geschehens, Strömungen von Wärme, von gelöster Substanz, von Flüssigkeit und von Elektrizität, sind untereinander nicht gleichwertig an Bedeutung. Strukturen besitzen eine natürliche Wichtigkeit von verschiedenen Graden, je nachdem ob sie häufig oder selten zur Ausbildung kommen. Da es sich hier durchweg um Fälle von zeitlich ganz oder fast unveränderlichen Gebilden handeln soll, und im Naturverlauf die Bedingungen nicht für sehr lange Zeit konstant zu bleiben pflegen, denen physikalische Systeme unterworfen sind, so werden diejenigen zeitunabhängigen Gestalten sich nur selten wirklich ausbilden, welche von einem beliebigen Anfangszustand aus erst nach langem zeitlich variablen Verlauf in den ruhenden oder stationären Zustand

---

[1]) Vgl. Planck, Thermodynamik, 3. Aufl., § 238.

übergehen; im allgemeinen werden sich vielmehr die äußeren Bedingungen (physikalische Topographie usw.) schon wieder geändert haben, noch ehe das „Sich-Tragen" der Momente gemäß den anfänglichen Bedingungen zustande gekommen ist. Zeitlich (fast) unveränderliche Strukturen dieser Art sind also zwar real sehr wohl möglich, dürften aber häufiger unter Laboratoriumsbedingungen als in freier Natur angetroffen werden. Dagegen gibt es auch stationäre Gestalten, die sich ähnlich schnell wie die elektrostatische Ruhestruktur ausbilden, die deshalb immer wieder Zeit finden, unter natürlichen äußeren Umständen auch wirklich spontan zu entstehen und dann noch anzudauern. Zu ihnen gehören vor allem die stationären elektrischen Ströme. Wegen der Wichtigkeit, die ihnen schon aus diesem Grunde zukommt, sollen gerade ihre Gestalteigenschaften noch näher betrachtet werden.

105. Der Strom bedarf zu seinem Bestehen elektromotorischer Kräfte. Damit diese als hinreichend konstant gelten können, mögen sie für die Untersuchung als in Akkumulatoren erzeugt vorausgesetzt werden. Als physische Formen, in denen der Strom sich außerhalb der Stromquelle verbreitet, liegen unserer Vorstellung Netze dünner Metallzylinder, Fäden oder Drähte konstanten Querschnittes nahe, und da aus guten technischen Gründen dieser Leiterform eine Art selbstverständlicher Alleinherrschaft in der Technik und praktischen Physik zukommt, so wird vielfach, wenn vom elektrischen Strom die Rede ist, diese einfachste Form des durchströmten Raumes vorausgesetzt. Aber darin liegt nichts theoretisch Notwendiges, und die Verwandtschaft der Strömungsverbreitung mit den elektrostatischen Gestalten tritt weit besser hervor, wenn man den zu untersuchenden Leiter als einen Körper beliebiger Form annimmt. — Der Strom verbreitet sich im allgemeinen Fall gemäß den Eigenschaften des gesamten leitenden Systems, zu welchem also die Stromquelle selbst und die vollständige geschlossene Verbindung zwischen ihren Polen gehört. Als vollkommene geschlossene Gestalt, die also sich selbst erhält, kommt ja von vornherein auch nur die in sich zurücklaufende elektrische Strömung in Betracht. Wie es aber in der theoretischen Physik üblich ist, wollen wir eben voraussetzen, die Strömung in einem zu betrachtenden leitenden Körper könne für sich allein untersucht werden, obwohl sie sich über ihn hinaus fortsetzt. Das kommt auf dasselbe hinaus, als wenn wir annehmen: Das Geschehen an denjenigen Grenzflächen des Körpers, durche welche der Strom in ihn ein- und aus ihm abgeleitet wird, soll als äußere Bedingung von genau bekannten Eigenschaften vorgeschrieben und auch demgemäß realisiert sein. Wie man sieht, handelt es sich hier um eine der mehrfach erwähnten Annahmen, durch welche in der Physik Gestaltprobleme vereinfacht,

dafür aber auch der Untersuchung leichter zugänglich gemacht werden.

106. Solche Annahmen dürfen nicht ganz willkürlich gemacht werden. Grenzt z. B. der leitende Körper in größeren Flächen an das übrige leitende System an, und denkt man sich die Art und Weise *gegeben*, wie der Strom durch diese Berührungsflächen hindurchtritt, so unterliegt eine solche Grenzbedingung selbst noch der weiteren Anforderung, daß der Gesamtbetrag zu- und abgeleiteter Strömung, für die Grenzflächen zusammengenommen, gleich Null sei; denn sonst wäre kein stationäres Geschehen möglich. Für unsere Fragestellung noch wichtiger ist das folgende Bedenken: Die Art der Strömung in den Grenzflächen des betrachteten leitenden Körpers hängt selbst von der Form dieses Körpers (und zugleich von der Form der übrigen Leitung) ab. Wir sind kaum in der Lage, dieses Geschehen an den Elektroden willkürlich vorzuschreiben, solange nicht ganz besondere Umstände vorliegen; das stationäre Strömen bildet eben zu beiden Seiten der Kontaktfläche und durch sie hindurch eine Einheit, die sich selbst regelt. Wenn wir trotzdem nicht das gesamte leitende System als *eine* physische Form behandeln und für diese die Untersuchung führen wollen, so müssen wir auf Allgemeinheit der Fragestellung verzichten und den betrachteten leitenden Körper zu einer *praktisch* einzelnen Form machen, indem wir seinen Zusammenhang mit dem übrigen System reduzieren, d. h. die Elektroden auf kleinste Kontaktflächen beschränken. Dafür kann man auch sagen: Wir untersuchen Fälle, wo die starke Gestalt in einer ausgedehnteren schwachen Gestalt liegt, und deshalb der Formeinfluß innerhalb des ganzen Gebildes gewisse Grenzen nicht überschreiten kann; zwischen diesen Grenzen ergibt sich dann die Raumstruktur der Strömung nur von der betreffenden Einzelform abhängig. In den winzigen Grenzflächen soll das Potential nicht merklich variieren, sie werden als Punkte behandelt, in denen die Zu- und Ableitung etwa durch allerfeinste Drähte erfolgt.

Bei größerer Ausdehnung der Kontaktstellen verschafft man sich wohl auch berechenbare Fälle, indem man einen geeigneten Sprung der Leitfähigkeit an der Grenzfläche ansetzt und damit in hier nicht zu erörternder Weise die Grenze zur Niveaufläche macht. Aber dann gilt die Rechnung wieder nur für diese Bedingung[1]). — Die natürliche Problemstellung geht eben auf das *ganze* durchströmte Leitersystem, und die beschriebene Absonderung der Frage für einzelne kompakte Formen bedeutet einen Verzicht, welcher, durch die Schwierigkeit der Aufgabe veranlaßt, doch etwas Unangenehmes behält. Denn für physisch ebensogut mögliche Fälle, in denen keine der vereinfachenden Voraussetzungen zutrifft, können uns derartige Rechnungen nicht allzuviel helfen.

[1]) Vgl. hierüber *Brillouin*, Propagation de l'Électricité, Paris, Hermann, 1904, S. 76 ff.

107. Der Körper soll mit der übrigen Leitung durch nur zwei Kontaktstellen, also eine Anode und eine Kathode verbunden sein, seine Oberfläche wird im übrigen als vollkommen isoliert, sein Material als durchweg homogen vorausgesetzt [1]). — Ist dann λ die spezifische Leitfähigkeit des Materials, V das Potential des elektrischen Feldes, S irgend eine geschlossene Fläche im Leiter, n die innere Normale zu ihr, so strömt nach Ohm der Betrag

$$-\lambda \iint \frac{\partial V}{\partial n} dS$$

pro Zeiteinheit in die geschlossene Fläche ein. Im stationären Zustand hat sich das Geschehen spontan derart räumlich angeordnet, daß an keinem Punkt die Strömung oder das Potential mit der Zeit variieren. Also tritt dann aus jeder beliebigen, aber geschlossenen Fläche im Innern des Leiters eben der Strömungsbetrag im ganzen aus, der im ganzen in sie einmündet, und es folgt (vgl. oben 92) als Bedingung des stationären Stromes

$$\iint \frac{\partial V}{\partial n} dS = 0$$

für jede geschlossene Fläche im Leiter. Eine Funktion V, die diese Bedingung erfüllt, ist aber nach Gauß Lösung der Laplaceschen Differentialgleichung oder harmonische Funktion in der betrachteten Raumform. V ist bei diesem Problem ähnlich für das Leiterinnere zu bestimmen, wie im elektrostatischen Fall für den umgebenden Nichtleiter. Während aber das elektrostatische Feld durch Leiteroberflächen auf konstantem Potential begrenzt war und in weitester Ferne wie $\frac{1}{r^2}$ verschwinden sollte, werden die Grenzbedingungen hier, daß bis auf zwei vorgeschriebene Punkte (Elektroden) durch die äußere Grenzfläche des Körpers kein Strom hindurchtritt, d. h. $\frac{\partial V}{\partial n}$, senkrecht zur Oberfläche genommen, an ihr verschwindet. Also soll die Richtung von $\frac{\partial V}{\partial n}$, d. i. bis auf das Vorzeichen die Richtung der Feldstärke und der Strömung, sich an der Oberfläche dieser anschmiegen (mit Ausnahme der Elektrodenpunkte), und die Niveauflächen sollen senkrecht auf die Grenzflächen auftreffen.

108. Für das Ziel dieser Untersuchung kommt es auf folgende Eigenschaften der Stromverbreitung an:

---

[1]) Das Verhalten von Stromlinien an Materialgrenzen soll hier der Kürze wegen nicht behandelt werden.

a) Sobald der Strom geschlossen ist, erfolgt die Verschiebung von Potential und Strömung in die stationäre Ausbreitung, allenfalls durch ein kurzes Oszillieren hindurch, mit reißender Geschwindigkeit, und danach bleibt das Geschehen sich unverändert gleich, solange an den Bedingungen nichts geändert wird. Bei gegebener Form des leitenden Körpers kann man also von der zugehörigen Eigenstruktur der in ihm verbreiteten Strömung sprechen. — Unter welchen Umständen das Geschehen seine eigenen Bedingungen allmählich umformt, ist später zu erwähnen.

b) **109.** In der gegebenen leitenden Form kann kein beschränkter Teil strömungsfrei bleiben oder strömungslos gemacht werden, und ebensowenig läßt sich die Eigenstruktur summativ aufbauen, indem man etwa „Teilströme“ durch beschränkte Längsschichten zwischen den Elektroden, einen nach dem anderen aneinanderfügte. Jeder starke oder schwache Strom, der in der gegebenen Form überhaupt auftritt, erfüllt spontan ihre ganze Ausdehnung [1]). Ebenso betrifft jeder Eingriff in das Geschehen prinzipiell entweder die Eigenstruktur durchweg oder überhaupt nicht; entsteht die geringste Veränderung an einem Punkt, so reagiert die ganze Strömung mit derselben Schnelligkeit, mit welcher sie entstanden ist. In einzelnen Gebieten des Leiters sind insofern nicht „Teile“ der Strömung anzutreffen, die so auch ohne die übrige Strömung an ihren Orten zu finden wären, bei der theoretischen Erfassung des Geschehens in einzelnen Gebieten hat man vielmehr wie im elektrostatischen Fall von „Momenten“ zu sprechen, die die übrige Strömung „tragen“, wie sie umgekehrt von ihr erhalten werden; denn als selbständige Gebilde sind sie auf der gegebenen physischen Form nicht existenzfähig. Kennt man erst die Struktur der Strömung im ganzen Leiter, so ist es freilich statthaft, ein Raumgebiet willkürlich zu irgendwelchen Zwecken allein zu betrachten, aber man muß sich dabei bewußt bleiben, daß dort das lokale Geschehen in seiner spezifischen Art nur insofern verläuft, als auch die Strömung im ganzen leitenden System unverändert andauert.

Bei gegebener Eigenstruktur führt eine Integration, quer durch den Leiter über eine Niveaufläche hin, zu einer Summe, der Gesamtstromstärke; aber in Struktur für die gesamte Leiterform hat sich zuvor entschieden, welche stetige Raumfunktion als „Stromdichte“ in diese Integration eingeht. Ebenso setzt die theoretische Bestimmung des Gesamtwiderstandes Kenntnis der Strömungsart im Leiter voraus, genau wie die Berechnung elektrostatischer Kapazitäten Kenntnis der elektrostatischen Eigenfunktion. — Das „Summiertwerden-Können“ von Beträgen über Flächen hin ist also scharf zu unterscheiden von einem „Summativ-Verteiltsein“ dieser Beträge. Vielleicht

[1]) Riemann-Weber, a. a. O. II, S. 481.

ist die Meinung, in der Physik kämen nur Undverbindungen vor, durch nichts so sehr begünstigt worden, wie durch die erstere Möglichkeit; trotzdem besagt diese gar nichts zur Gestaltfrage.

c) **110.** Die Ausbreitung der elektrischen Strömung ist von der Form des Leiters in anderer Weise abhängig, wie eine elektrostatische Ladungsstruktur. Während in der Elektrostatik als bedingende Form nur die geometrische Beschaffenheit der festen äußeren Oberfläche in Betracht kam, und die Eigenstruktur z. B. gar nicht davon abhing, ob der Leiter hohl oder massiv war, ist für den stationären Strom, der den ganzen leitenden Körper erfüllt, dessen ganzes Innere wichtig und bestimmend. Der einfachste Fall in dieser Hinsicht wird vorliegen, wenn das Innere von leitendem Material gleichmäßig erfüllt ist.

Dabei wird immer vorausgesetzt, daß im Prinzip stets die gesamte Form die Strömung an jeder Stelle im Leiter mitbestimmt. Es versteht sich, daß man z. B. nicht den Leiter durch irgendwelche Querschnitte in Schichten zerlegt und für eine jede einzeln nach ihrer Form die Strömung bestimmt denken darf. Die Struktur der Strömung in einem Leiter ist keineswegs die Zusammensetzung von beschränkteren Strukturen, die etwa solchen Teilen der physischen Form für sich zugehörten; in jeder der gedachten Querschichten würde die Strömungsausbreitung ganz verschieden ausfallen, je nachdem wie die weiterhin folgende Form beschaffen wäre. Freilich nimmt der Einfluß entfernterer Formbereiche mit ihrer Distanz ab (vgl. oben 39).

Wir sahen schon oben, daß man spezielle Elektrodenbedingungen einführen muß, um überhaupt für eine herausgegriffene Form des ganzen leitenden Systems eine bestimmte Strömungsart angeben zu können; handelt es sich nicht um Punktelektroden u. dgl., so wird der gleiche Leiter je nach der Form der anschließenden Systemgebiete auch auf andere Weise durchströmt sein können. — Wenn Punktelektroden den Zusammenhang mit dem übrigen Stromkreis herstellen, gehört ihr Ort zu den wesentlichen Bestimmungsstücken der physischen Form, weil eine Verschiebung einer oder beider Kontaktstellen bei sonst gleicher Form natürlich die Struktur der stationären Strömung total verändern wird.

d) **111.** Wenn die physische Form durchweg aus gleichartigem Material besteht, dann ist es für die Struktur der stationären Strömung völlig gleichgültig, welches dies Material ist, wenn es nur überhaupt den Strom zu leiten vermag. Die Ausbreitungs- oder Verlaufsart bleibt also, wofern die Form des Leiters nicht verändert wird, durchaus dieselbe, ob es sich nun um vorzüglich leitfähiges Material wie Silber oder um einen viel schlechteren Leiter wie Blei handelt. Auch der Aggregatzustand ist gleichgültig; denn wenn flüssigem Quecksilber durch ein isolierendes Gefäß bestimmte Formen vorgeschrieben werden, so ist die Struktur

der Strömung wiederum die gleiche, als würde festes Metall von derselben Raumform durchströmt. — Es kommt endlich nichts darauf an, ob es sich überhaupt um einen Leiter erster Klasse handelt oder um einen Elektrolyten, in welchem also die Strömung an eine Wanderung von Materie gebunden ist; wird die Lösung durch ein isolierendes Gefäß in bestimmte Form gebracht, so bildet sich die Strömung wie in einem Metall derselben Form aus. (Soviel ich sehe, gilt das gleiche von dem elektrolytisch geleiteten Strom in geschmolzenen Salzen.) Der elektrolytisch geleitete Strom unterscheidet sich jedoch von dem metallisch geleiteten durch die Tendenz, die eigenen Bedingungen allmählich zu ändern und damit unter Umständen auch die eigene Struktur zu verschieben. Das Gesagte gilt also nur, solange die Bedingungen noch mit denen in einem metallisch leitenden Körper gleicher Gesamtform vergleichbar bleiben. — Unter derselben Einschränkung für nichtmetallische Leitung ist die Strömungsausbreitung von der Gesamtrichtung des Geschehens unabhängig; wird die Strömungsrichtung umgekehrt, so drehen sich die maßgebenden Vektoren (Feldstärke, Stromdichte) überall „am Ort“ (ohne gegenseitige Verschiebung) um 180°.

e) **112.** Wenn die Batterie, welche den Strom liefert, verstärkt oder der Leitungswiderstand an irgend einer Stelle außerhalb des betrachteten Körpers verringert wird, so wächst die Elektrizitätsmenge an, die in der Zeiteinheit durch die Elektroden ein- und austritt, d. i. die Intensität der Gesamtströmung. Ob diese Veränderung die Struktur angreift, wird nach demselben Kriterium wie früher im elektrostatischen Fall entschieden: Verschieben sich dabei die Momente der Struktur gegenseitig? — Wir machen die Hypothese, das sei nicht der Fall, sondern die Stromdichte an jedem Punkt ändere sich einfach ihrem ursprünglichen Wert proportional, also „am Ort“. War bei der ursprünglichen Stromstärke die resultierende Strömungsdichte senkrecht zu einer beliebigen geschlossenen Fläche S durch eine Funktion i_n gegeben, so galt im stationären Zustand

$$\lambda \iint \frac{\partial V}{\partial n} dS = \iint \lambda \frac{\partial V}{\partial n} dS = \iint i_n dS = 0;$$

zugleich war die Grenzbedingung erfüllt, daß an der ganzen freien Oberfläche des Leiters i_n verschwand. Ist die Hypothese richtig, so wird aus i_n überall αi_n; und diese Multiplikation mit einer Konstanten verträgt die homogene Bedingungsgleichung natürlich; strömte zuvor ebensoviel in die geschlossene Fläche ein, wie im ganzen durch sie ausströmte, so gilt dasselbe, nachdem alle Strömungsmomente im gleichen Maße verändert sind. Da unsere

Hypothese alle Vektorrichtungen bestehen läßt, bleibt ferner die Vorschrift an der äußeren Leiteroberfläche erfüllt, und es ergibt sich, daß die hypothetisch angenommene Strömungsart wirklich die Struktur des stationären Stromes von veränderter Intensität darstellt. Ohne Verschiebung der Momente gegeneinander, in bloßem Anwachsen „am Ort“ und unter Beibehaltung der Richtungen ist also die eine Strömung in die andere überzuführen; beide haben gleiche Struktur; die Struktur ist (wie dem leitenden Material nach) hinsichtlich der Intensität der Strömung transponierbar.

Hieraus folgt nachträglich, daß Änderungen der Leitersubstanz auch dadurch nicht die Strömungsausbreitung verschieben, daß sie (im allgemeinen) Veränderungen der spezifischen Leitfähigkeit und damit der Gesamtintensität des Stromes herbeiführen.

In einer Beziehung aber muß mit einer gewissen Einschränkung von Indifferenz der Struktur gegen Änderungen der Gesamtströmung gesprochen werden. Denkt man sich diese durch Herabsetzung der wirksamen elektromotorischen Kraft bewirkt, so wird, wenn der betrachtete Leiter ein Elektrolyt ist, der abnehmende Strom zwar seine Struktur beibehalten, solange er besteht. Sobald aber die elektromotorische Kraft unter einen bestimmten Minimalbetrag sinkt, welcher erforderlich ist, um die Ionen an Elektroden abzuscheiden, setzt die reguläre Strömung überhaupt aus. Der Strömungsanlaß wird erst von einem gewissen Schwellenwert an dauernd wirksam, welcher von der Natur der Elektroden und der Lösung abhängt.

f) **113.** Wird der gegebene Leiter dem Maßstab nach verändert, jedoch derart, daß der größere (oder kleinere) Leiter dem ersten geometrisch ähnlich bleibt, so läßt sich genau das gleiche Kriterium verwenden. Vor der Veränderung war in stationärer Struktur

$$\iint i_n \, dS = 0$$

für jede beliebig gewählte geschlossene Fläche im Leiter und i_n verschwand an der freien Oberfläche. Wir machen die Hypothese, i'_n, die Dichte an der homologen geschlossenen Fläche S' im Innern des neuen Leiters, sei einfach αi_n, wo α wiederum eine Konstante bedeutet. Wird mit β die lineare Maßstabvergrößerung des Leiters bezeichnet, so geht dS in $dS . \beta^2$ über, und der Gesamtfluß durch S' ist

$$\iint i'_n \, dS' \quad \text{oder} \quad \alpha \beta^2 \iint i_n \, dS,$$

und in diesem zweiten Integral ist die Summation wieder über S zu erstrecken. Sie ergibt nach Voraussetzung Null, also ist auch

$$\iint i'_n \, dS' = 0.$$

Da ferner an der freien Oberfläche $i'_n (= \alpha i_n)$ verschwindet, so erfüllt die Hypothese auch die Grenzbedingung. Durch Vergrößerung oder Verkleinerung der leitenden Form durchweg im gleichen

Maßstab werden also die Momente nicht gegenseitig verschoben, sondern tragen sich in homologer Lage nach wie vor unter gleichmäßiger Steigerung oder Herabsetzung ihrer Beträge. Die Eigenstruktur der stationären Strömung in einem Leiter hängt von deren geometrischer Form im prägnanten Sinn, nur von ihren relativen und nicht von ihren absoluten Massen ab, sie ist den Dimensionen nach transponierbar und genügt damit dem zweiten Ehrenfelskriterium für Gestalten.

Auch hier macht man sich die physische Realität dieser Eigenschaft dadurch klar, daß man bedenkt: Selbst geringe Deformationen des Leiters, an einer Stelle beliebig vorgenommen, führen im Prinzip zu einer gegenseitigen Verschiebung der Momente durch den ganzen Körper und also zu einer veränderten Struktur durchweg.

Analog wie im elektrostatischen Fall sieht man außerdem schon an einfachen Beispielen, daß von zwei Strömungen in verschieden großen, aber geometrisch ähnlichen Leitungssystemen homologe Stellen physikalisch-funktionell gleichartige Wirkungen aufweisen. Denken wir uns der Anschaulichkeit wegen als Leiter zwei Rotationskörper gegeben, welche der Achse nach durchströmt werden, geometrisch ähnlich sind und an einer Stelle eine Einschnürung haben. Der eine Leiter möge beispielsweise in dieser Region bis auf einen Durchmesser von 0,5 mm, der andere auf 2 mm verjüngt sein, so daß also der zweite überall linear im Verhältnis 4 : 1 größer ist als der erste. Lassen wir durch den ersten Leiter immer stärkere Ströme fließen, so wird er sich immer stärker erwärmen, aber an der schmalsten Stelle, wo die Stromdichte maximal ist, wird die Temperatur schneller ansteigen, und hier wird der Leiter schließlich durchschmelzen. Im zweiten Leiter muß bei fortgesetzter Stromverstärkung an der homologen Stelle die Temperatur am schnellsten steigen, und er wird hier durchschmelzen, weil diese Stelle in dem transponierten Geschehen die funktionell entsprechende ist. Das Verhalten des Stromes ist in der hier betrachteten Funktion analog dem des Menschen, der in der Tonsukzession $d_1\, g_1\, g\, c_1$ das c_1 mit dem charakteristischen „Gefühlston“ des Abschlusses in tonaler, nicht nur zeitlicher Bedeutung hört, aber in der Sukzession $a_1\, d_2\, d_1\, g_1$ dieselbe Wirkung im Erreichen des g_1 verspürt[1]).

g) **114.** Es bedarf kaum einer Erwähnung mehr, daß das erste Ehrenfelskriterium für jeden stationären Strom erfüllt ist. Selbstverständlich kann von einer Eigenstruktur der Strömung nur so lange die Rede sein, als die Strömung ein Gesamtvorgang in einem physikalischen System ist. Ströme in voneinander getrennten Leitersystemen beeinflussen ihre Struktur gegenseitig nicht[2]) und würden nur ihre materiellen Träger wechselseitig im Raum verschieben (durch die ponderomotorische Wirkung ihrer elektromagnetischen Felder), wenn diese nicht fixiert wären. Was diesen Punkt anbetrifft, so ist es überdies unmöglich, einen einzelnen leitenden Körper für sich schon als physikalisches System zu be-

[1]) Der Inhalt von e und f ist für Mathematiker insofern selbstverständlich, als die Bedingungen in i_n und S homogene Form haben.

[2]) Ich sehe von dem speziellen Fall eines merklichen Halleffektes ab.

trachten; der ganze „Stromraum“ mit der Stromquelle darin muß ein mehrfach zusammenhängendes Gebilde sein, und Aufhebung der leitenden Verbindung an einem Querschnitt der Strombahn bringt ja die Strömung überall zum Verschwinden (vgl. oben 106).

Das Ergebnis dieser Betrachtung bestätigt die zuvor vor allem auf methodologische Gründe gestützte Behauptung: Stationäre elektrische Ströme in gegebenen physischen Formen sind diesen zugehörige physikalische Gestalten. Es gibt physisches Geschehen von Gestalteigenschaften.

115. Die Gestalten stationärer elektrischer Strömung sind weniger mit der Ausbreitung von Ladungen auf Leiteroberflächen als mit den Strukturen elektrostatischer Felder verwandt. An der freien Oberfläche der stromführenden Leiter sowie an den Unstetigkeitsflächen, in denen zwei Leiter verschiedenen Materials aneinanderstoßen, ergeben sich bei näherer Untersuchung freilich Probleme, welche mit den früher behandelten der Ladungsausbreitung nahe zusammenhängen, aber im Innern homogener Leiter, die stationär durchströmt sind, findet man, solange man nicht molekulartheoretisch vorgeht, freie Elektrizität überhaupt nicht. Die Verwandtschaft elektrostatischer Felder um Leiter und durchströmter Felder im Innern von Leitern ist in formaler Hinsicht so groß, daß man Ausdrücke, die der Beschreibung stationärer Strömungen entstammen, gern auch auf elektrostatische Felder überträgt, also von „Kraftfluß“, „Induktionsfluß“, „dielektrischem Widerstand“ spricht. Umgekehrt sind deshalb zur Kennzeichnung der Strömungsgestalt auch dieselben Methoden anwendbar, welche man zur Charakterisierung von ruhenden Feldern benutzt.

116. Die wichtigste Größe ist in diesem Fall wieder das elektrische Potential: Kennt man dieses im gegebenen Leiter als eine Funktion der Raumkoordinaten, so ist man damit über jede Frage unterrichtet, die gegenüber der Struktur des Geschehens aufgeworfen werden kann. Flächen, in denen das Potential konstanten Wert hat, und längs deren keine Strömung stattfindet, sind Niveauflächen der Struktur. Schnitte dieser Flächen mit einer passend durch die Struktur hindurchgelegten Zeichnungsebene, geben ein anschauliches Bild des Geschehens; aber man erreicht einen unmittelbareren Eindruck, wenn man außerdem einzeichnet, an welche Linien sich die resultierende Strömung überall anschmiegt, in welchen Richtungen also überall die Strömung verläuft. Diese zu den Niveauflächen senkrechten Stromlinien fallen mit den Kraftlinien zusammen, da ja an jedem Punkt die Strömung in Richtung der Feldstärke erfolgt. Wie sie an verschiedenen Stellen des Strömungsfeldes gedrängt oder breiter auseinander liegen, zeigen sie sehr einfach, wo in der Struktur das gegenseitige „Sich-Tragen“ ein

lebhaftes Geschehen bedingt, und wo es ruhiger in der Strömung zugeht. Darüber, was solche graphischen Darstellungen leisten können, und worin sie der Natur gar nicht entsprechen sollen, wäre hier dasselbe zu sagen wie früher (vgl. oben 48).

117. Im Innern des homogenen Leiters wird, solange die Strömung besteht, fortwährend gerichtete Energie des Flusses in ungerichtete Energie umgesetzt, nach Joule in der Zeiteinheit ein dem Widerstand und dem Quadrat der Strömung an jeder Stelle proportionaler Betrag. Wenn wir uns den Leiter durch Niveau- und Strömungsflächen [1]) in kleine (infinitesimale) Elemente soweit geometrisch unterteilt denken, daß schließlich eines von ihnen als ein Zylinder gelten kann, so ist dessen Widerstand bei einer Länge dn und einem Querschnitt dS gleich $\frac{dn}{\lambda . dS}$. Bedeutet i die Strömungsdichte (senkrecht zu dS), so stellt $i . dS$ die gesamte Strömung durch den Zylinder dar, und die Stromwärme für diesen wird $\frac{i^2 (dS)^2 dn}{\lambda . dS}$. Setzt man in diesem Ausdruck für i noch seinen Wert $-\lambda \frac{\partial V}{\partial n}$ und für das Volumen des kleinen Zylinders $dn . dS$ das Zeichen des Raumelementes $d\tau$, so ergibt sich die Joule-Wärme im ganzen untersuchten Gebiet als $\lambda \iiint \left(\frac{\partial V}{\partial n}\right)^2 d\tau$ und in der Raumeinheit als $\lambda \left(\frac{\partial V}{\partial n}\right)^2$. Bis auf den Unterschied der Materialkonstanten in den beiden Fällen (Dielektrizitätskonstante und spezifische Leitfähigkeit) wird diese Energiegröße also räumlich auf gleiche Art bestimmt wie die potentielle Energie im elektrostatischen Feld [2]).

Die Energiedichte der Strömung ist mit dem Potential oder mit der Strömung selbst nicht-additiv ausgebreitet. Will man sich die Struktur auch in dieser Hinsicht anschaulich machen, so zeichnet man die Kurven (als Durchschnitte von Flächen), in denen gleiche Stromarbeit geleistet wird. Das müssen Kurven sein, in denen die Feldstärke oder $\frac{\partial V}{\partial n}$ oder $\frac{\lambda \partial V}{\partial n}$, d. h. die Stromdichte, einen konstanten Wert behält, wie ja das aus der Natur der Sache hervorgeht. Mathematisch genügt wieder die Kenntnis von V, um die Flächen $\frac{\partial V}{\partial n} = \text{konst.}$ festzulegen, und übrigens sieht man auch

[1]) Sofern dieser Ausdruck nicht unmittelbar verständlich ist, vergleiche man Maxwell, a. a. O. I, S. 412 ff.

[2]) Vor deren Ausdruck tritt noch der Zahlenfaktor $\frac{1}{8\pi}$ (vgl. 50).

einem Bild nur von Niveau- und Strömungslinien bereits an, wie sich die Strömung in Einzelgebieten mehr oder weniger verdichtet, wie also die Energie im Leiter ausgebreitet ist.

Da in einem Elektrolyten, z. B. in einer dissoziierten wässerigen Lösung die Dielektrizitätskonstante ε einen angebbaren Wert besitzt, für das Lösungsmittel Wasser bei gewöhnlichen Temperaturen ungefähr 80, so muß der Ausdruck

$$\frac{\varepsilon}{8\pi}\iiint\left(\frac{\partial V}{\partial n}\right)^2 d\tau$$

in diesem Falle genau wie für ein anderes elektrostatisches Feld potentielle elektrostatische Energie des durchströmten Gebietes bedeuten. Sonst würde ja in das Begriffssystem eine merkwürdige Inkonsequenz kommen. Diese Energieform in stromführenden Elektrolyten wurde früher wenig beachtet, hat aber später zu wichtigen Untersuchungen Anlaß gegeben; im homogenen Leiter ist ihre Struktur mit der der Arbeitsleistung räumlich identisch. An Unstetigkeitsflächen der Strombahn wird die elektrostatische Energie durch bisweilen starke ponderomotorische Kräfte wirksam.

118. Ist der Leiter Elektrolyt, so gewinnen die Strömungslinien und Linien gleicher Stromdichte noch eine zweite und unter Umständen fundamentale Bedeutung. Denn da in Leitern zweiter Klasse die elektrische Strömung Materie in Ionenform oder auch geladene Kolloidteilchen mit sich führt, so sind hier Strömungslinien zugleich Kurven, in deren Richtung die wägbare Substanz wandert, und gleiche Stromdichte bedeutet gleichen Betrag von Substanztransport in der Zeiteinheit und auf der betreffenden Linie. Elektrisch geführt, nimmt die wandernde Materie hier an den Gestalteigenschaften des stationären elektrischen Stromes teil. Das verdient schon aus folgendem Grunde Beachtung: Wandernde Materie kann auch ohne elektrische Eigenschaften stationäre Gestalten ausbilden, vor allem bei der gewöhnlichen Diffusion in Lösungsmitteln gegebener Raumform; aber wegen der Langsamkeit der nur osmotisch bedingten Diffusion wird es nicht gerade leicht dazu kommen, daß über größere Raumgebiete hin diese Art Strömung in kurzer Zeit ein straff zusammenhängender Gesamtvorgang oder eine stationäre Gestalt wird. Die Strömung elektrisch geführten Materials dagegen nimmt an der enormen „Elastizität" des elektrischen Feldes teil, welche in dessen Ausbreitungsgeschwindigkeit besonders deutlich zum Ausdruck kommt, und so wird die elektrolytische Substanzverschiebung auch durch ausgedehnte Bereiche hin fast momentan gemäß den vorgeschriebenen Gesamtformen einsetzen; wenn überhaupt eine stationäre elektrolytische Strömung wird praktisch sofort auch Wanderung der stromführenden Substanz in stationärer Struktur erfolgen.

119. Die vom elektrolytischen Strom geführte Materie kann nicht irgendwo verloren gehen, und in allen Formen elektrolytisch

leitender Systeme, auf die wir hier Rücksicht zu nehmen haben, wird sie an Grenzflächen gebracht, welche wenigstens manche der wandernden Stoffe nicht zu passieren vermögen. Es ergeben sich an solchen Elektroden (die nicht Metalle zu sein brauchen) die Erscheinungen der elektrolytischen Abscheidung und der Polarisation. An jenen Grenzflächen tritt (nicht mehr wandernde) Materie irgendwelcher chemischer Eigenschaften auf, die der Strom bis dorthin geführt hat, bisweilen durch chemische Umsetzungen verwandelt; an den Elektroden entstehen neue elektromotorische Kräfte, auch schon nach ganz kurzer Stromdauer. Beide Vorgänge bedeuten eine Veränderung der Bedingungen, unter denen die Gestalt sich zuerst befand. Die elektromotorischen Kräfte der Polarisation werden in verschiedener Weise auf die Strömungsart zurückwirken, und dasselbe gilt von den abgeschiedenen Substanzen oder Produkten der Elektrodenreaktionen. Wachsen die Stoffmengen, welche der Strom an die Grenzflächen bringt, mit längerer Stromdauer immer mehr an, so ist die notwendige Folge, daß die Strömung selbst allmählich ihre eigene physische Form und damit sich selbst umbildet. Wird ihr irgendwie ständig neues Material als Stromträger zugeführt, dann baut sie immer weiter in der Umgebung jener Grenzflächen, und so muß die physische Form von diesen Stellen aus nicht allein sich umbilden, sondern auch gewissermaßen wachsen, da ja nicht beliebige Substanzmengen auf konstanten Raum eingeschränkt bleiben können.

In gewissen Fällen wirken schon geringe Spuren von Abscheidungsprodukten als ungeheure Widerstände für den Strom, der sie an die Grenzfläche gebracht hat, so daß selbst bei hohen elektromotorischen Kräften im Kreis die Strömung sich den Weg versperrt.

120. Bisher hatten wir die Gestalten nur als streng-stationäre Gebilde kennen gelernt, denen ihre physische Form unveränderlich vorgeschrieben war. Man sieht hier, wie zum mindesten die Geschehensstrukturen die Tendenz in sich tragen, auf ihre eigene bedingende Topographie eine Rückwirkung auszuüben und auf diesem Umweg auch sich selbst (z. B. elektrochemisch) fortzuentwickeln. In welcher Richtung diese Umbildung liegt, ist eine Frage von entscheidender Bedeutung für die Theorie der Gestalten. Handelt es sich um Fälle, wie den hier betrachteten, so darf der Vorgang noch im Gebiet der stationären Geschehensarten behandelt werden; denn im allgemeinen verläuft er so langsam, daß er ohne merklichen Fehler als eine Abfolge sehr benachbarter stationärer Strukturen, als quasistationäre Verschiebung aufgefaßt werden kann (vgl. oben 4). Deshalb läßt sich schon hier folgendes behaupten: Das Geschehen an den Grenzflächen der Strombahn (Elektroden) ist durch die Richtung und Dichte des Substanztransportes bedingt,

und da über diese Faktoren die Gesetze der Strömungsgestalten entscheiden, so wird auch die quasistationäre Fortentwickelung der Bedingungen, mit ihr die Umbildung der Struktur selbst, von Gestaltfaktoren bestimmt.

Eine schnell verlaufende Selbständerung der Strömungsgestalt in Elektrolyten kann erfolgen, wenn die elektrostatischen Kräfte, welche an den Grenzflächen angreifen (vgl. oben 117), diese wirklich zu verschieben vermögen; denn ein derartiger Vorgang bildet naturgemäß die Strömung sogleich um.

121. Eine wesentliche Eigenschaft der stationären elektrischen Ströme in Leitern erster und in solchen zweiter Klasse wurde noch kaum erwähnt. Jeden elektrischen Strom umgibt und durchdringt ein magnetisches Feld, das er selbst schafft, wenn er entsteht und das verloren geht (genauer: in Induktionswirkungen umgesetzt wird), wenn die Strömung aufhört. Dieses ruhende Magnetfeld ist ohne Zweifel eine so notwendige Seite der Stromgestalt, wie das elektrostatische Feld als eine Art Fortsetzung zu der ruhenden Ladung eines Leiters hinzugehört. Daß seine Realität von derselben Wertigkeit ist wie die des elektrischen Feldes, ergibt sich schon daraus, daß es sich wie dieses mit Lichtgeschwindigkeit ausbreitet, sobald irgendwo eine elektrische Strömung auftritt. Sonst aber ist die Natur der beiden Feldarten recht merklich dadurch verschieden, daß die magnetischen Kraftlinien in sich zurücklaufen, geschlossene Kurven bilden, indem sie den Leiter umringen, und daß nur außerhalb des Leiters ein Potential der magnetischen Feldstärke besteht. Im Leiter (in der Strömung) ist das magnetische Feld nicht von einer Punktfunktion abzuleiten, dagegen wird durch das erste Tripel Maxwellscher Gleichungen ein fester Zusammenhang zwischen der Ausbreitungsart der Strömung und der räumlichen Gruppierung des magnetischen Feldes im Strom angegeben. Obwohl schon hiermit entschieden zu sein scheint, daß auch das Feld des Stromes echte Struktureigenschaften besitzt, bedarf die Frage einer sehr genauen Untersuchung. Hätte das magnetische Feld genau analogen Zusammenhang mit der Strömung wie das elektrostatische Feld mit einer elektrostatischen Ladungsstruktur, so müßte man wohl zunächst erwarten, jede Beeinflussung des magnetischen Feldes von einer (dauernden) Verschiebung auch der Strömungsart gefolgt zu sehen, aber diese Erwartung entspricht, abgesehen von der Anwendung starker äußerer Magnetfelder (Hall-Effekt), nicht den Tatsachen. Veränderungen des Magnetfeldes erzeugen in der Regel nur vorübergehende dynamische Strömungsverschiebungen, nach deren Ablauf der Strom auch im geänderten Feld die frühere Struktur wieder annimmt. Es ergibt sich wohl ein Zug oder Druck, der den stromführenden Leiter in

bestimmter Weise zum Magnetfeld zu orientieren sucht, nicht aber, wenn der Leiter festliegt, eine merkliche Strukturverzerrung. Daher kommt es auch, daß mehrere benachbarte Leiter, von nicht miteinander kommunizierenden stationären Strömen durchflossen, außer jenen ponderomotorischen Wirkungen keine gegenseitige Beeinflussung zeigen, sondern ihre Magnetfelder Punkt für Punkt addieren, während sich die Strömungsgestalten als solche wie gleichgültig füreinander verhalten. Der Unterschied gegen Gesamtstrukturen von Ladungen und Feldern in der Elektrostatik könnte kaum größer sein (vgl. oben 44).

In älteren physikalischen Werken wird auf diese Tatsache bisweilen sehr nachdrücklich hingewiesen, ohne daß doch der Lernende ganz verstände, wie er sie sich erklären soll. So sagt z. B. Maxwell geradezu, magnetische Kräfte wirkten auf den Leiter, nicht auf den Strom (II, S. 157). Doch wörtlich darf das nicht genommen werden; denn der nichtdurchströmte Leiter, etwa aus Silber hergestellt, würde von den magnetischen Kräften keinen merklichen Einfluß erfahren. Also primär greift die Wirkung gewiß an der Strömung an, sucht diese zu verschieben (oder ihr Magnetfeld), und es bleibt als Erklärung, daß die Strömungsgestalt ein äußerst straffes Gebilde ist, dessen Struktur nur schwer verändert werden kann, dessen geringste (unmerkliche) Verzerrungen aber schon relativ sehr große Drucke auf das stromführende Material (den Leiter) ausüben und es so im Raum bewegen.

122. Ein historischer Umstand gibt den ponderomotorischen Kräften zwischen durchströmten Leitern ein besonderes Interesse für unseren Zusammenhang. Nach den Entdeckungen Ampères bemühte man sich alsbald um eine genaue Vorstellung von der elektromagnetischen (elektrodynamischen) Wechselwirkung, und der sehr allgemeinen Richtung europäischer Wissenschaft folgend, welche das Verständnis eines Ganzen sucht, indem es „Teile“ an ihm betrachtet, kam man zur Aufstellung von Elementargesetzen, welche der Wirkung eines Stromelementes auf ein anderes entsprechen sollten. Durch Integration gelangte man von solchen Elementargesetzen zu Ausdrücken, welche die Wirkung ganzer Stromkreise richtig wiedergeben. Da verschiedene Gesetze, hypothetisch für Stromelemente aufgestellt, derart gewählt sein können, daß die Integration dieselben, und zwar die erfahrungsgemäßen Gesetze für ganze Ströme liefert, so entstand eine Diskussion, und unter den polemischen Positionen besagt eine das folgende: Mathematische Ausdrücke, welche die Wechselwirkung zweier Stromelemente aufeinander quantitativ festlegen sollen, sind reine Fiktionen. Niemand kann überhaupt beweisen, daß die beobachtbare Gesamtwirkung zweier Stromkreise als ganzer aufeinander notwendig und einfach die Summe von Wechselwirkungen je zweier Stromelemente sein müsse; denn experimentieren läßt sich der Natur der Sache nach nur mit geschlossenen, mit ganzen Strömen, weil es keine selbständigen Stücke Strom geben kann. — Dieser Gedanke ist

nahe verwandt mit dem Inhalt des ersten Ehrenfels-Kriteriums und mit theoretischen Anschauungen in der neueren Psychologie; das Stromgeschehen ist nur mit gewissen „Ganzheitseigenschaften" möglich.

Durch die Elektronentheorie und durch die elektromagnetischen Beobachtungen an bewegten elektrischen Ladungen überhaupt sind inzwischen neue Gesichtspunkte für die erwähnte Diskussion gewonnen worden. — Ich glaube kaum, daß alle Physiker heutzutage mit der radikal-positivistischen Anschauung einverstanden wären, welche z. B. Chwolson vertritt, und für die Gestalttheorie liegt kein Grund vor, den Sinn elektrodynamischer Differentialgesetze für schlechthin fiktiv-mathematisch zu halten. Die Kritik des summativen Verfahrens in Theorien geht in der ersten Reaktion leicht sehr weit, auch in der Psychologie wurde das rein summative Denken zuerst nicht durch eine konkrete Konzeption der Gestaltkategorie abgelöst, sondern durch die Behauptung, im Grunde sei nur das „Gesamtbewußtsein" primär gegeben (vgl. oben auch die Äußerung Maxwells 49).

123. Der Gestaltcharakter elektrischer Strömungen kommt ihnen ohne jede Rücksicht auf physikalische Materialhypothesen zu, solange das Geschehen, welches als elektrischer Strom bezeichnet wird, denselben Charakter hat, wie bisher vorausgesetzt wurde, also stationär in gegebener Form verläuft. Die allgemeinen Gesetze der Stromausbreitung hat scharf zuerst Kirchhoff formuliert, und seither sind genug Materialannahmen darüber aufgestellt worden, was denn eigentlich im Leiter strömt, und welche Geschwindigkeiten dabei auftreten. Von einigen Fragen spezielleren Charakters abgesehen, haben diese Hypothesen kaum Einfluß auf die Theorie der Strömungsausbreitung gehabt. Das kann ja nicht anders sein, wenn zwei Strömungsarten von so sicher verschiedener „Materialnatur" wie die elektrolytische und die metallische Leitung denselben Strukturgesetzen folgen und in gleichen Leiterformen gleiche Strukturen ausbilden. Der Satz, stationäre elektrische Ströme seien ihren Leiterformen zugehörige Gestalten, behält demnach seine Gültigkeit ganz unabhängig davon, welches Schicksal die Materialhypothesen auf elektrischem Gebiet in Zukunft haben werden. Wäre er falsch, so müßte sich das heute ebensogut erweisen lassen, wie in irgend einer späteren Zeit; denn man brauchte nur zu zeigen, daß die einfachen Grundlagen von Kirchhoff her Fehler enthalten.

124. Die Schwierigkeiten, auf welche eine experimentelle Analyse der Strömungsgestalten stößt, sind im allgemeinen groß wie im elektrostatischen Fall und oft, wenigstens für die Methodik der Gegenwart, geradezu unüberwindlich. Indessen gibt es eine Art physischer Formen, deren zugehörige stationäre Strukturen sich stets messend recht genau ermitteln lassen, und ferner eine andere Art von leitenden Systemen, in denen man sich wenigstens über gewisse Querschnitte durch die Strömungsgestalt in zugleich ein-

facher und zuverlässiger Weise zu orientieren vermag. Das messende Verfahren im ersten Fall stellt eine Nullmethode dar und hat formal gewisse Analoga in der psychologischen Methodik; im zweiten Fall schreibt die Strömung an einem ihrer Querschnitte die eigene Struktur auf und leistet so von selbst, was der Mathematiker nach rechnerischer Ermittelung der Stromverbreitung etwa in mühsamer Zeichenarbeit zur besseren Veranschaulichung auch tun könnte.

Wenn der zu untersuchende Leiter als ein Körper gegeben ist, dessen Ausdehnung (Dicke) in einer Dimension sehr gering und konstant ist, oder wenn von vornherein feststeht, daß die Strömungsart in dieser Dimension nicht variiert, so wird man die Struktur kennen, sobald sie auf der ausgedehnten Oberfläche des Leiters ermittelt ist. Diese aber kann untersucht werden, ohne daß der Vorgang des Beobachtens selbst die Struktur merklich veränderte. Setzt man zwei feine Drähte, welche zu den Kontaktstellen eines empfindlichen Galvanometers führen, mit ihren Spitzen auf zwei Stellen der durchströmten Fläche, so wird im allgemeinen, weil die berührten Punkte verschiedenes Potential haben, ein Zweigstrom in die Drähte abgeleitet werden und sich im Galvanometer anzeigen; zugleich wird eine gewisse Beeinflussung der Strömungsgestalt durch den hergestellten Nebenschluß auftreten. Sobald die Drähte abgehoben werden, stellt die Strömung ihre Eigenstruktur von selbst wieder her. Verschiebt man dagegen eine der feinen Drahtspitzen allmählich auf der Fläche, während die andere an ihrem Ort aufgesetzt bleibt, so wird das Galvanometer in dem Augenblick seine Ruhestellung annehmen, also kein Strom mehr durch den Nebenschluß fließen, wo die sondierenden Drähte beide auf der gleichen Niveaulinie, auf Stellen desselben Potentials die Fläche berühren. In dieser Lage aber bewirken die Spitzen keine merkliche Beeinflussung der Strömung mehr, und man darf die so gefundenen Punkte gleichen Potentials als solche auch der unberührten Platte ansehen. Wird das Verfahren fortgesetzt, so lassen sich ganze Linien konstanten Potentials feststellen, und am Ende wird etwas beschwerlich, aber doch mit Erfolg die Struktur der Strömung durchweg bestimmt.

Den stationären elektrischen Strom im Innern eines dreidimensional massiven metallischen Körpers seiner Struktur nach messend zu untersuchen, ist dagegen kaum möglich, da man, um einen inneren Punkt zu sondieren, den Leiter öffnen und also die physische Form, sowie die Struktur selbst verändern müßte. Fälle also, in denen das Geschehen an der Oberfläche kein ausreichendes Bild von der Strömung überhaupt gibt, können experimentell nicht untersucht werden.

Die Nullmethode, auf Platten angewendet, stimmt mit einer größeren Anzahl von psychologischen Methoden darin überein, daß sie das Ver-

schwinden von Gestaltwirkungen beobachtet und dabei scharfe Resultate erhält. Beim Untersuchen positiver Gestalteigenschaften auf direktem Wege ist naturgemäß der Einfluß des Untersuchens auf sein Objekt viel störender.

125. Eine elektrische Strömung kann ihre eigene Ausbreitungsart aufzeichnen, wenn sie in einem geeigneten Elektrolyten geleitet wird, und deshalb Materie gewissermaßen als ihr Schreibmaterial mit sich führt. Erstreckt sich eine der Grenzflächen (Elektroden), durch welche die mit dem Strome wandernde Substanz nicht passieren kann, und welche zum untersuchten leitenden System gehört, in großer Ausdehnung quer durch die Strombahn hindurch, so wird im allgemeinen die Stromdichte an dieser Fläche nicht überall gleich, sondern die Flächen gleicher Stromdichte werden gemäß der Strömungsstruktur gruppiert sein und jene Grenzfläche in bestimmten Kurven schneiden. Also muß die in Struktur wandernde Substanz sich auf der ausgedehnten Elektrode in verschiedener Dichte, nämlich entsprechend der Strömungsdichte niederschlagen, und wenn der Elektrolyt passend gewählt ist, so wird die Farbe der Fläche nach kurzer Zeit an verschiedenen Stellen verschieden, aber in Kurven gleicher Stromdichte konstant sein und so eine einfache Abbildung des Strukturquerschnittes geben. Da geringe Ablagerungen genügende Wirkungen hervorbringen, so kann der Versuch abgebrochen werden, ehe umgekehrt eine merkliche Beeinflussung des leitenden Systems (der bedingenden Topographie) durch die Aufzeichnung dieser „Nobilischen Ringe“ erfolgt. Die abgeschiedenen Substanzmengen, noch nicht störende Ansätze zu einer Veränderung der physischen Form (vgl. oben 119), sind in das stationäre Wandern der Materie nicht mehr einbezogen und von diesem nicht mehr abhängig; wenn also die Ursachen des Geschehens verschwinden, d. h. der Strom unterbrochen wird, so können diese Abbilder des Strukturquerschnittes als bleibende Erinnerungen des gestalteten Strömens andauern. Freilich ist zu bedenken, daß man nicht ohne weiteres in elektrolytisch leitende Formen an beliebigen Stellen solche Zeichenflächen einsetzen kann, wenn es gilt, die Strömungsgestalt für jene Formen zu ermitteln. Denn man erhält dabei den Strömungsquerschnitt für eine physische Topographie mit Einschluß der eingeführten Fläche, nicht die Strömungsgestalt ohne diese Veränderung der physischen Form[1]). Trotzdem kann die Methode gute Dienste leisten; denn für die Topographie, zu welcher auch die Zeichenfläche gehört, ergibt sich jedenfalls ein korrektes Strukturbild.

126. Da im allgemeinen die Schwierigkeiten einer mathematischen Bestimmung der Strömungsart ebenfalls groß sein werden

[1]) An der Grenzfläche treten z. B. die Erscheinungen der „Strombrechung“ auf, die ich hier nicht behandeln kann.

wie im elektrostatischen Fall, insofern wieder für ein gegebenes Raumgebiet eine hinzugehörige harmonische Funktion zu finden ist, so liegt es nahe, zunächst die umgekehrte Methode Maxwells anzuwenden und für willkürlich gewählte Strömungsarten (harmonische Funktionen V) hinzupassende Leiter zu suchen, um die so gewonnene „historische Kenntnis“ später bei vorgeschriebenen Leiterformen verwenden zu können [1]). Die allgemeinen Betrachtungen, auf die man dann geführt wird, sind den im elektrostatischen Fall angestellten sehr ähnlich. Nur ist jetzt leitende Form, was früher Dielektrikum war, und die Grenzbedingungen sind andere.

127. Trotz der nahen Verwandtschaft der theoretischen Aufgaben für elektrostatische Felder in Nichtleitern und für Strömungsgestalten in Leitern kann man übrigens sagen, daß die Probleme der letzteren Art oft leichter zu lösen sind als jene elektrostatischen, oder wenigstens, daß die Struktur von Strömungen in einer größeren Anzahl von Fällen ohne Mühe anzugeben ist. — Vergleichen wir beide Aufgaben z. B. bei einer und derselben physischen Form:

Ein seiner Achse parallel sehr lang erstreckter Zylinder von kreisförmigem Querschnitt trägt in der mittleren Region die ruhende Ladung gleichmäßig verbreitet auch in dem Sinne, daß auf je einem Kreise (senkrecht zur Achse) die Dichte ringsum dieselbe ist. Sobald dagegen der Querschnitt seine Form ändert, wird die Struktur ringsum inhomogen und kann bei einem Zylinder von beliebiger Querschnittsform gewiß recht ungleichmäßig und komplex, für die mathematische Bestimmung höchst unbequem ausgebreitet sein. Analoges gilt vom umgebenden Felde; es hat recht einfache Eigenschaften für den Kreiszylinder, ist aber nur schwer bestimmbar für Zylinder unsymmetrischer Querschnitte. Die stationäre elektrische Strömung verhält sich ganz anders: Fließt sie in Richtung der Achse, so ist die Stromdichte über jeden Querschnitt des Zylinders hin konstant, nicht nur, wenn dieser Querschnitt ein Kreis ist, sondern bei jeder Querschnittsform, immer vorausgesetzt, daß es sich um dieselbe Zylinderform für beträchtliche Längserstreckung handelt, daß die Strömung die Seitenwände durchaus nicht passieren kann, daß die Untersuchung nur Gebiete betrifft, die von andersgeformten anschließenden Leiterteilen großen

[1]) Dieser Weg ist auch sonst in der theoretischen Physik recht gebräuchlich, und zwar stets wegen derselben Schwierigkeit einer direkten Strukturbestimmung. Saint Venant hat ihn z. B. bei der Behandlung von Torsionsproblemen eingeschlagen, und wieder ebenso verfährt man in der Hydrodynamik (Riemann-Weber, a. a. O. II, S. 178ff., 483ff.).

Abstand haben. — Wird die Richtung der Achse als x-Koordinate gewählt, so ist ja

$$V = Ax$$

(wo A eine Konstante bedeutet) ein Potentialausdruck, für welchen ΔV in der Tat verschwindet, für den zugleich $\frac{\partial V}{\partial n}$ an der Mantelfläche jedes Zylinders (ohne Rücksicht auf die Querschnittsform) Null ist, der also für alle Zylinder (fern von anschließenden anderen Formen) die Lösung angibt. Die Niveauflächen aber sind dann Ebenen senkrecht zur Achse, der Gradient $\frac{\partial V}{\partial x}$ im Leiter ist konstant (A), und die Stromdichte durchweg dieselbe ($\lambda . A$). — So findet man die Struktur der Strömung für eine große Mannigfaltigkeit von verschiedenen physischen Formen, für alle langgestreckten Zylinder, und zwar ohne jede Mühe. Derartiges gibt es in der Elektrostatik nicht.

128. In der gleichen Richtung einer Problemvereinfachung wirkt der mehrfach erwähnte Umstand, daß getrennte stromführende Leiter — sehr im Gegensatz zu dem Verhalten von elektrostatischen Ladungen auf benachbarten Leitern — einander nahe benachbart sein können, ohne ihre Strukturen gegenseitig zu verzerren: Der Formeinfluß ist in der stationären Strömungsstruktur nur innerhalb der zusammenhängenden Strombahn wirksam, und wird also von einem Gebiete ins andere um so größer sein, je stärker die Teile des Systems miteinander kommunizieren (vgl. oben 106). Da die gewöhnlich benutzten und untersuchten Leiter langgestreckte schmale Formen darstellen, so hat deshalb eine Biegung, Verbreiterung oder Formänderung überhaupt schon in einigem Abstand keine merkliche Wirkung mehr auf ein weiterhin anschließendes Leitergebiet; der Formeinfluß ist zwar prinzipiell immer für die gesamte Struktur durchweg maßgebend, aber praktisch hat es oft keinen Sinn, jenseits einer gewissen Entfernung von einem Formteil noch dessen Einfluß auf die Einzelstruktur der Strömung wirklich quantitativ zu berücksichtigen. Seine Eigenschaften kommen für diese ferneren Gebiete des leitenden Systems nur noch en bloc in Betracht, gemäß dem oben (97) besprochenen Gestaltzusammenhang innerhalb eines einfachen Stromkreises.

In einem Falle, wenn nämlich ein schmaler Zylinder auf eine sehr viel breitere Form leitenden Materials stößt, weiß man nach Rechnungen Rayleighs sehr gut abzuschätzen, wie tief in den Zylinder der Einfluß der anschließenden Verbreiterung eindringt.

Wenn der Einfluß anschließender Leiterformen auf die Einzelstruktur in relativ abgesonderten Gebieten durch geeignete Elektrodenwahl schließlich ganz verhindert wird, geht die starke Gestalt

in eine schwache über, welche jedoch mehrere starke Strukturen der Einzelgebiete in sich schließt. Jedes der Einzelgebiete bestimmt durch seine Eigenstruktur einen Einzelwiderstand und nach Ohm und Kirchhoff findet man in Systemen simultaner Gleichungen die Gesamtmomente (Stromstärken) der Einzelgebiete (vgl. oben 96).

129. Wenn man mehrere elektrische Ladungen auf getrennten Leitern weit voneinander entfernt, so wird (vgl. 43 f.) allmählich der elektrostatische Gestaltzusammenhang schwächer, und bei sehr weiten Abständen kann man schließlich ganz von ihm absehen. Die Ladungen bilden noch immer eine räumliche Konfiguration, aber diese ist eine reine Verteilung geworden; nur auf jedem einzelnen Leiter gibt es noch eine Struktur der Ladung. Im Raume gruppierte Ladungen brauchen also nicht notwendig Gestaltzusammenhang zu haben. — Schon aus den letzten Paragraphen folgt, daß das Entsprechende von elektrischen Strömen gilt. In der Physik würde noch von einem elektrischen Strome gesprochen werden (und zwar mit sehr gutem Recht), wenn eine Anzahl von freien Elektronen im leeren Raume, voneinander weit genug entfernt, um sich nicht merklich zu beeinflussen, gerade und etwa parallele Bahnen durcheilen. Stromrichtung und Stromstärke der Gesamtheit lassen sich in einem solchen Falle sehr wohl definieren, aber eine Struktur oder auch eine Gestalt wenigstens in der Hinsicht, die bisher allein maßgebend war, liegt nicht vor; die Gesamtheit, als Strom betrachtet, ist rein additiver Natur. Also muß streng an der Formulierung festgehalten werden: Stationäre elektrische Ströme in gegebenen leitenden Systemen sind diesen zugehörige Raumgestalten.

Viertes Kapitel.

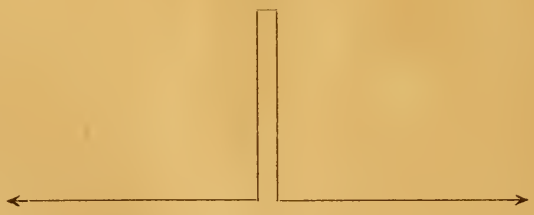
Übersicht.

130. Eine Ansicht von der physischen Welt wäre: Die Natur besteht aus Undverbindungen selbständiger Teile, deren rein additive Gesamtheit das Wirkliche ausmacht. Eine zweite und entgegengesetzte Anschauung wäre: In der Natur gibt es keine selbständigen Teile, sondern alle Zustände und Verläufe sind nur im totalen Weltzusammenhange wirklich, alle „Teile“ sind Abstraktionsprodukte. Der erste Satz ist ganz unrichtig; aber auch der zweite hindert eher ein Verstehen des Gestaltprinzips, als daß er es fördert. Er klingt nicht wie ein Ergebnis von Forschung und Erfahrung, sondern wie die etwas ungefähre, wenn schon vielleicht

stark gefühlsbetonte Äußerung eines Menschen, welcher, wie es vorkommt, für Augenblicke der strengen Denkwege müde wurde und, ohne ihrer überhaupt zu achten, ja im Gegensatz zu ihnen, sich schnell mit einer Art romantisch-philosophischer Erbauung zufrieden gibt. Denn wenn das richtig wäre, was da behauptet wird, dann würde der Wert der meisten naturwissenschaftlichen Entdeckungen und Gesetze sehr gering einzuschätzen sein, insofern auf den universalen Weltzusammenhang in ihnen nicht Rücksicht genommen wird, und der gleichen Verurteilung würden die physikalischen Gestalten unterliegen. Je bestechender eine solche Vorstellung von der Welteinheit zunächst aussieht, desto mehr muß man beachten, daß sie über die Existenz von physischen Gestalten in einem fruchtbaren und wissenschaftlich sehr realen Sinne des Wortes geradezu hinwegtäuscht.

131. Radioaktive Substanzen zerfallen in gesetzmäßiger Weise, strahlen dabei und lassen einen chemisch veränderten Rückstand zurück. Der Zerfall schien sich mit der größten Gleichgültigkeit gegen den Zustand und die Kräfte selbst der nächsten Umgebung zu vollziehen, und schon um die Natur des Vorganges dabei zu erkennen, wandte man starke und stärkste, zugleich die verschiedensten Mittel an, die eine Beeinflussung des Umwandlungsprozesses erzielen sollten, konnte aber (soweit meine Kenntnis vom Stand der Dinge reicht) eine Einwirkung nicht einwandfrei nachweisen. Zeichnen wir also den Zusammenhang der übrigen Welt mit dem Zerfall an einer Stelle eines radioaktiven Präparates symbolisch auf, indem wir die „Stärke des Zusammenhanges“ für jeden Weltpunkt mit jenem Geschehen als Ordinate über der Entfernung als Abszisse auftragen, so ergibt sich ein Schema der Form

Fig. 2.



(Man muß sich das Bild ins Mehrdimensionale übertragen denken.) Die stärksten Energien und Energieumsetzungen können weit oder nahe gegeben sein und noch in den Raum des Präparates eindringen, ohne daß der radioaktive Prozeß verändert würde. Wohl aber ist andrerseits kein Zweifel, daß innerhalb von kleinsten Räumen, welche die errechneten Dimensionen von Atomen haben, ein Zusammenhang allerstärkster Art vor dem Zerfall besteht,

dessen Geschehensform bestimmt, aber auch im Zerfall gründlich verändert wird. Daß es niemals gelingen werde, die Umwandlung dennoch von der übrigen Welt aus zu beeinflussen, möchte ich nicht behaupten; aber es kommt auch nichts darauf an, da jedenfalls beträchtliche Kräfte der Umgebung unter sonst günstigen Umständen keinerlei Einwirkung erzielten, welche neben dem unwiderstehlichen Kräftespiel im Innern der kritischen kleinen Bereiche hätte festgestellt werden können. Für die untersuchten Fälle bleibt es also dabei, daß der Weltzusammenhang sozusagen unstetig ist, für oder in bezug auf das Geschehen an gewissen, wenigstens ungefähr sehr wohl angebbaren Grenzen plötzlich ansteigt oder abfällt, innerhalb der Grenzen enorme Stärke hat und draußen (immer in bezug auf jenes Geschehen) ganz verschwindet. In diesem Sachverhalt liegt bereits die Kritik des allgemeinen Satzes. Der Ausdruck „ganz verschwindet", welcher formal inkorrekt sein könnte, hat für das Naturerkennen in einem solchen Falle viel mehr Wert als die These vom universalen Weltzusammenhang, welche in einem rein formalen Sinne vielleicht zutreffen mag. Denn jene Beschreibung weist direkt auf die markanteste Eigenschaft der beobachteten Erscheinungen hin, als welche man den abrupten Absturz des Zusammenhanges (an den Grenzen vermutlich eines Atoms) bezeichnen kann; dieser Satz dagegen gibt uns eine unkontrollierbare Vermutung, zu welcher die Erfahrung hier sicher durch nichts veranlaßt. Man kann freilich nicht ausschließen, nicht den Nachweis bis zu beliebig niedrigen Größenordnungen führen, daß wirklich nicht der geringste Einfluß womöglich von den Fixsternen her in das Präparat hineinreicht, und vielleicht gibt es dergleichen; aber die Behauptung vom allgemeinen Weltzusammenhang erwähnt dafür überhaupt nicht, was die Erfahrung im untersuchten Falle vollkommen beherrscht. Und was wollen wir denn mit wissenschaftlichen Sätzen leisten? Formal vielleicht richtige Sätze, die am Gegenstande der Aussage nichts Wesentliches kennzeichnen, dagegen etwas Unwesentliches mit Nachdruck formulieren, sind reine Spreu oder gar Schädlinge, insofern sie vom Wesentlichen ablenken; und ein Ausspruch, der statt der formal möglichen 1 neben 10^{10} kurzweg Null setzt, dabei aber den Charakter des untersuchten Gebildes gut kennzeichnet, ist ungleich höher einzuschätzen, als wenn jemand richtig sagte: „Es handelt sich da jedesmal um Zahlen", ohne hinzuzufügen, daß z. B. die eine eben 1, die andere 10^{10} ist.

Die Naturkräfte und -zusammenhänge machen nicht einfach Halt an räumlichen Grenzen radioaktiver Atome, das radioaktive Präparat liegt im Gravitationsfelde der Erde, es ist Verschiebungen thermischer Art ausgesetzt (über welche sich seine spontane Temperatursteigerung lagert) usw., aber solche Faktoren greifen eben nicht in den Zerfallsprozeß ein und stehen

also nicht mit ihm, sondern nur durch sein Gebiet hindurch in sich in Zusammenhang. In dem räumlichen Schema läßt sich das nicht anschaulich wiedergeben.

132. Daß ein lokales Geschehen in diesem Maße eine winzige Ereigniswelt für sich ausmacht, ist freilich ein singuläres Vorkommen, aber gerade als ein Extrem ist es geeignet, auch in der übrigen Natur erkennen zu lassen, weshalb die romantische These so wenig Sachliches besagt, oder vielmehr einfach irreführt. Überall ist dabei nicht etwa zu behaupten, irgend ein Geschehen oder ein Zustand sei notwendig und immer ohne Zusammenhang mit der Welt außerhalb eines ein für allemal bestimmten Gebietes gegeben, sondern nur, daß überaus zahlreiche Fälle als endlich beschränkte Zusammenhänge in bezug auf Zustand und Geschehen in einer untersuchten Hinsicht vorkommen. Wie groß das Gebiet ist, über welches hinaus jeweils keine Zusammenhänge mehr zu berücksichtigen sind, das hängt von den Umständen, nämlich davon ab, wie starke physische Agenzien welcher Art in der Umgebung zu finden sind. Aber der erste Anfang alles physikalischen Experimentierens besteht eben darin, jenes Gebiet genügend zu bestimmen, und wo dergleichen möglich ist, gibt der Satz vom Weltzusammenhang wieder ein trügerisch gleichmäßiges Bild von der Natur, während in Wirklichkeit viel charakteristischere, weil beschränkte Typen von Zuständen und Verläufen realisiert werden. Weiterer Einzelbeispiele bedarf es hier nicht, da nur immer wieder das Gleiche ihnen gegenüber zu bemerken wäre. „Alles hängt mit allem zusammen", das ist kein Satz, der die spezifischen und irgendwie wertvollen Eigenschaften von Beobachtetem angäbe oder zu deren Verständnis viel beitrüge. Fundamentale Erfahrung aller Experimentatoren ist es im Gegenteil, daß neben den Zusammenhängen gewisser endlicher Gebiete, welche dabei in sich sehr bestimmten Gesetzen folgen, der übrige Weltzusammenhang (mit dem Zustande innerhalb der Gebiete) wie 1 neben 10^{10} anzusehen ist. Wir würden keine Naturwissenschaft haben, falls jene ungefähre These eine reale Bedeutung hätte; und wenn der Satz nicht dazu bestimmt sein sollte, so ernstlich auf konkrete Fälle angewendet zu werden, dann kommt er auch als Ausdruck einer allgemeinen Naturanschauung nicht in Betracht; denn wir werden doch nicht neben unserem sonst konsequenten Naturerkennen eine schön und philosophisch klingende Phrase gelten lassen, welche mit jenem strengen Verfahren unverträglich ist[1]).

[1]) Es mag allenfalls sein, daß man dem Satz einen anderen, bisher noch nirgends angegebenen und besseren Sinn verleihen kann. — Bei Mach (Mechanik) kommt die These dadurch zustande, daß die Begriffe „physische Abhängigkeit, physischer Zusammenhang" auf der einen und „Beziehung

133. Daß die naturwissenschaftliche Forschung sich durch diesen Satz hätte ernstlich stören lassen, ist wohl noch nicht oft vorgekommen. Dagegen wirkt er für eine naturphilosophische Betrachtung, in welcher nicht konkrete physikalische Fälle eine Hemmung bilden, um so schädlicher, als er wie die äußerste Anerkennung des Gestaltprinzips klingt, während er es in Wirklichkeit verdirbt.

Die Gefahr liegt gerade darin, daß man mit einer so allgemeinen und dabei unbestimmten These ja doch nicht Ernst machen kann, und daß deshalb auch niemand daran denkt, aus ihr wirklich Konsequenzen im positiven Sinne zu ziehen. Denn die „ganze Welt" auf einmal, welche von rechtswegen in jede Untersuchung einzubeziehen wäre (wenn sie für das betreffende Geschehen wirklich von Belang wäre), läßt sich ja doch nicht übersehen und kontrollieren, also ist die erste Folge, daß man in der Naturphilosophie von dem nebelhaften Satz entweder zu einem romantischen Skeptizismus übergeht oder aber sich sagt: Wenn wir doch ein Bild von der Natur gewinnen wollen, dann muß wohl oder übel der universale Weltzusammenhang dabei wie nicht vorhanden angesehen werden, und wir müssen die nur abstrahierten Teile oder Stücke der Natur wieder wie wahrhaft selbständig behandeln. Also kehren wir praktisch zu der Annahme zurück, die Welt bestehe aus selbständigen Teilen und ihren jeweiligen Undverbindungen.

134. Daß diese Gefahr nicht erdacht ist, kann man an dem analogen Fall der Psychologie sehen. Der größte Feind einer fruchtbaren, weil zu konkreten Folgerungen verpflichtenden Gestalttheorie dürfte hier die These gewesen sein, unmittelbar gegeben sei eigentlich nur das Gesamtbewußtsein schlechthin. Mit dieser Art Realität kann man nicht wirklich umgehen; also bleibt es einerseits bei der (recht platonischen) Zustimmung zu dem modernen Satz, andrerseits fühlt man sich berechtigt, jede Abstraktion als gleichbegründet (genauer: gleich unbegründet) anzusehen, und das Bewußtsein wieder so stückmäßig zu behandeln, wie beispielsweise der Philosoph Hume es zu tun pflegte. Der Fehler liegt genau an derselben Stelle wie im Fall der physischen Welt. „Zusammenhang durchweg" wird eingesetzt, wo wiederum der Zusammenhang in „einzelnen Bereichen" zur „Umgebung" oft sehr steile Gefälle bildet, jedenfalls ein gleichmäßig starkes Ineinandergreifen sicher nicht vorliegt. Davon aber, daß der Zusammenhang innerhalb gewisser Gebilde sehr kräftig und diesem

schlechthin" (z. B. in einem Koordinatensystem) einander gleichgesetzt werden. Das wird sehr deutlich S. 222 ff. (der französischen Ausgabe). Übrigens ist dies einer der Punkte, wo Gestalttheorie und Relativitätstheorie alsbald in Berührung kommen dürften.

Verbande gegenüber der Zusammenhang sonst oft kaum vergleichbar sein kann, erwähnt die These vom Gesamtbewußtsein nichts, und deshalb gibt dieser Sachverhalt auch nicht zu der natürlichen theoretischen Gliederung Anlaß; sondern wenn man sich entschließt, praktisch vom Gesamtbewußtsein abzusehen, so glaubt man nun, sehr mit Unrecht, zu annähernd beliebigen Teilungen des Bewußtseins befugt zu sein, bis man z. B. bei den Punktempfindungen der herrschenden Raumpsychologie anlangt [1]).

Auf diese Art führt eine unklare Übertreibung schließlich zu dem Gegenteil des Gestaltprinzips zurück, weil das, worauf es eigentlich ankäme, das Bestehen von in sich geschlossenen Gestalten endlichen Bereiches mit streng angebbaren und wissenschaftlich sehr realen Eigengesetzen, bei jener scheinbaren Anerkennung des Gedankens gerade übersehen wird. — Die Rede vom allgemeinen Zusammenhang in der physischen Welt gibt ein Naturbild, das ohne Profile und innere Zeichnung, unterschiedslos und gleichmäßig in sich verschwimmt. Die Erfahrung aber zeigt vielfach beschränkte Gebiete, sogenannte physikalische Systeme, von dem übrigen Weltzusammenhang so weit unabhängig, daß deren Einfluß keinesfalls als den Kräften des inneren Zusammenhanges in ihnen gleichwertig angesetzt werden darf. Gesetze der Naturwissenschaft, wenn sie in einem klaren Sinne ausgesprochen werden, beziehen sich auf solche Systeme, und die spontane Ausbreitung physischen Materials in eben solchen ergibt physische Gestalten in der einzigen Bedeutung des Wortes, welche gegenwärtig klar und streng gemacht werden kann.

135. Eine der oben genauer behandelten Gestalten scheint dieser Darstellung zu widersprechen. Das elektrostatische Feld um einen geladenen Leiter erstreckt sich ringsum „bis ins Unendliche“, und die Energie der elektrostatischen Struktur ist in dem ganzen Raume zwischen der Leiteroberfläche und ringsum unendlicher Entfernung ausgebreitet; wenn man die Energiedichte als Punktfunktion kennt, so ergibt sich also der gesamte Energiebetrag durch eine Integration, in welcher als eine der Grenzen ∞ auftritt. Man hätte, da das Feld durch jede Inhomogeneität, jeden anderen Leiter usw. verzerrt wird, eine Beeinflussung des ganzen Gebildes von jeder beliebigen Entfernung her zu erwarten. — Hieran ist richtig, daß eine solche elektrostatische Gestalt nicht durch abrupte Grenzen gegen die Einflüsse der Umgebung abgetrennt ist, wie gewissermaßen der radioaktive Zerfall, sondern in einer breiten Zone je nach der Stärke der maßgebenden Faktoren verschieden kräftigen Einwirkungen unterliegt; aber dieser Zusammenhang nimmt immer noch schnell genug ab, wie man leicht sieht, wenn man die Ausdehnung des Feldes quantitativ prüft.

---

[1]) Ich will nicht leugnen, daß jedes aktuelle Bewußtsein in sich zusammenhängend auftritt. Aber für eben kommt viel mehr darauf an, daß diese Einheit im allgemeinen gegliedert ist, und in ihr Untereinheiten von viel größerer Festigkeit (Gestalten im engeren Sinn) gegeben zu sein pflegen.

Eine geladene Kugel vom Radius R und der Ladung η, welche von Luft umgeben ist, erzeugt in dem Abstande r von ihrem Mittelpunkte das Feld

$$\mathfrak{E} = \eta/r^2.$$

Ein Element des umgebenden Raumes ist in Polarkoordinaten $r^2 \sin\vartheta\, dr\, d\vartheta\, d\varphi$, die Energie im ganzen also (vgl. oben 50):

$$\frac{1}{8\pi}\int\int\int \mathfrak{E}^2 d\tau = \frac{\eta^2}{8\pi}\int_R^\infty \frac{dr}{r^2}\int_0^\pi \sin\vartheta\, d\vartheta \int_0^{2\pi} d\varphi = \frac{\eta^2}{2}\cdot\frac{1}{R},$$

wie ja auch direkt daraus folgt, daß der Radius R der Kugel ihre Kapazität angibt. — Wollte man anstatt bis $r = \infty$ nur bis $r = 100\,R$ integrieren, also bis zu einer gedachten Kugelfläche, die 100 mal soweit vom Mittelpunkt des Leiters entfernt wäre wie die Leiteroberfläche, so würde dabei der Energiebetrag

$$\frac{\eta^2}{2}\left(\frac{1}{R} - \frac{1}{100\,R}\right)$$

gefunden werden; d. h. für eine Kugel z. B. vom Radius 1 cm liegen 99 Proz. der Feldenergie nicht über 1 m von dem Mittelpunkte der Kugel entfernt, in 10 m Entfernung wäre der Rechnungsfehler noch 0,1 Proz. usw. Die Integrationsgrenze ∞ bedeutet also hier wie überall in der mathematischen Physik nur einen Betrag, der gegen irgendwelche maßgebenden Dimensionen des jeweiligen Problems sehr groß ist. Die Energie*dichte* ist in der Entfernung von 1 m schon ganz verschwindend verglichen mit der an der Leiteroberfläche ($10^8 : 1$), und man kann aus diesen Daten den Schluß ziehen, daß umgekehrt nur ein ganz ungewöhnlich starker Einfluß in einer Entfernung von etwa 10 m noch beachtenswerte Verzerrungen an der elektrostatischen Struktur bewirken wird. Denken wir uns eine Kugel vom Radius 10 m um den Leitermittelpunkt geschlagen, so können wir für alle normalerweise vorkommenden Verhältnisse von der Welt außerhalb der 10 m und ihrem Zusammenhange mit der elektrostatischen Gestalt absehen.

Das alles ist mathematisch schon deshalb selbstverständlich, weil die Integration bis zur Grenze ∞ nur dann einen Sinn hat, wenn der Unterschied zweier Integrationen bis zu zwei stark verschiedenen, sehr hohen, aber noch endlichen Grenzen immer geringer wird, wenn also selbst große Integrationsstrecken schließlich nichts Wesentliches mehr zum Resultat beitragen.

Wieder ist übrigens die Angelegenheit nicht allein räumlichen Charakters. Die Gravitation *durchdringt* die Struktur ohne Wirkung, Strahlung kann im allgemeinen den Leiter direkt treffen, ohne daß ein Einfluß merklich würde usw. — [Es ist allein Sache der Erfahrung, über die Grenzen beachtenswerten Einflusses zu entscheiden. So wissen wir jetzt, daß ein Leiter mit negativer Ladung durch kurzwelliges Licht eine deutliche Einwirkung erfährt.]

136. Während die Anerkennung des universalen Weltzusammenhanges wissenschaftlich zu nichts verpflichtet, weil man von ihr zu bestimmten Folgerungen ja doch nicht fortschreiten kann, und während sie praktisch auf die rein additive Weltanschauung zurückführt, handelt es sich in Strukturen endlichen Bereiches um selbständige innere Zusammenhänge von sehr bestimmten nichtadditiven Eigenschaften, und gerade wenn man zugleich erkennt, daß Material *auch* in rein additiven Verteilungen auftreten kann,

macht es einen sehr bedeutenden und realen Unterschied, ob man von dem Vorkommen des anderen Falles weiß oder nicht. Das Gestaltprinzip, seinen empirischen Gegenständen gemäß im Endlichen angewendet, fordert unmittelbare Konsequenzen, auch vor allem in der Einzelwissenschaft, und es wäre wunderlich, wenn diese nicht in der Behandlung biologischer und psychologischer Probleme bald merklich werden sollten [1]).

Von den spezifischen Zusammenhängen in solchen beschränkten physischen Gebieten war bisher die Rede. Die Ansätze gestaltmäßigen Denkens in der Psychologie und Biologie haben bisweilen die Befürchtung geweckt, es könne dabei auf eine unsichere Verschwommenheit hinauskommen, während die ältere additive Auffassung sich durch ihre Klarheit und Bestimmtheit empfehle. In den letzten Überlegungen ist zunächst gezeigt — und die Einzelbeispiele physikalischer Gestalten bestätigen es —, daß eine „Verschwommenheit nach außen" gerade bei Anerkennung der physikalischen Gestalten als vollkommen realer und konkreter Gebilde nicht in Frage kommt.

137. Ebensowenig aber mutet das gestaltmäßige Denken dem wissenschaftlichen Bewußtsein unklar-verschwommene Vorstellungen über das Innere des Gestaltbezirks und seiner maßgebenden Zusammenhänge zu. Mißtrauen in dieser Hinsicht war sicherlich für die Zurückhaltung vieler Forscher bestimmende Ursache, welche einen Gegensatz zwischen naturwissenschaftlicher Exaktheit und Gestaltprinzip zu sehen glaubten. Daß von dergleichen gar keine Rede sein, daß es nichts strenger Gesetzmäßiges und Geordnetes geben kann als physikalische Gestalten, müssen wiederum die näher behandelten Beispiele schon gezeigt haben. Anstatt dem Prinzip zu widersprechen, fordern die Naturwissenschaften, daß wir in wohlcharakterisierten Fällen gestaltmäßig denken. — Es handelt sich jetzt nicht mehr darum, die Existenz physischer Gestalten oder die Möglichkeit einer exakten Behandlung solcher Gebilde zu erweisen. Wohl aber empfiehlt es sich, soweit wie wir das bisher vermögen, übersichtliche Einheit in die Begriffe zu bringen, welche auf den Gestaltbezirk Anwendung finden. Alle Denkschwierigkeiten des Gebietes liegen in den Konzeptionen des Additiven und des Nicht-Additiven, welche einander auszuschließen scheinen; über den Sinn dieser Worte in der Anwendung auf Gestalten versuchen wir uns deshalb aufzuklären.

Thermodynamische Gleichgewichte in einer Phase sind Gebilde, welche Gestalteigenschaften haben, ohne daß es dabei (für makroskopische Be-

[1]) Die fruchtbare Anwendung auf soziologische, ethnologische, kulturwissenschaftliche Fragen dürfte etwas schwieriger sein.

trachtung) auf eine räumliche Ausbreitungsart ankäme (vgl. oben 99). Da es sehr schwierig ist, eine Ausdrucksweise zu finden, welche für solche Fälle und zugleich für die von Raumgestalten paßt, lasse ich jene Gruppe eben beiseite.

Ferner war von dem Unterschied der starken und schwachen Gestalten schon ausführlich genug die Rede. Eine Denkschwierigkeit liegt in diesen Begriffen wohl nicht: Unmittelbar formabhängige Gestalten heißen stark; insofern ein Gestaltzusammenhang von Raumformen nicht direkt, oder aber überhaupt nicht beeinflußt wird, wird er schwach genannt.

138. Die Begriffe des Teiles, des Summativen usw., welche als besonders bewährt gelten und gelten dürfen, verlieren von ihrer Bedeutung nichts, wo es sich um Gestalten handelt. Nur muß man sich vollkommen klar darüber sein, auf was sie im gestalteten Bereich angewendet werden dürfen; und um hier Schwierigkeiten aus dem Wege zu räumen, haben wir freilich Unterscheidungen einführen müssen, auf die man in der Naturphilosophie nicht immer hinreichend geachtet hat. Keine der in Gestalt auftretenden physischen Gegebenheiten (Elektrizität, elektrische Strömung, wandernde Materie usw.) bildete in den bisher untersuchten Beispielen ihre Strukturen frei aus, sondern immer handelte es sich um einen Komplex von unveränderlichen Bedingungen, welche das Strukturmaterial räumlich banden und zugleich seine Ausbreitungsart spezifisch bestimmten. Diese Bedingungen nannten wir die „physische Topographie", auch die „physische Form" des Gestaltbezirkes, wo von starken Gestalten die Rede war. Wir rechneten sie nicht in die Gestalt ein, da sie ja bestehen konnten, auch ohne daß eine zugehörige Gestalt gegeben war. So mußte der Leiter an und für sich (und für unsere Interessen) als derselbe gelten, ob er nun geladen war oder nicht, ob ein Strom durch ihn hindurchfloß oder nicht usw. Es ist richtig, daß der geladene Leiter z. B. dem elektrostatischen Zug nach außen unterliegt und deshalb seinen Kohäsions- und Elastizitätskräften nach beansprucht wird; aber solange er dabei keine merkliche Deformation erfährt, haben wir keinen Anlaß, hiervon bei Untersuchung der elektrostatischen Struktur Notiz zu nehmen.

In dem Falle, wo eine quasistationäre oder dynamische Verschiebung der Topographie durch die Kräfte der Struktur erfolgt und diese so sich selbst indirekt ändert, ist für die Dauer des Verlaufes diese Betrachtungsart nicht mehr korrekt, im dynamischen Fall schlechthin falsch, und muß also später bei näherem Eingehen auf veränderliches Geschehen (z. B. in Elektrolyten) entsprechend abgeändert werden; doch würde uns dergleichen vorläufig beirren.

139. Daraus folgt, daß übersummative Eigenschaften der Gestalt durchaus keinen Schluß auf übersummative Eigenschaften auch der bedingenden Topographie zulassen und an sich derartiges jedenfalls nicht erfordern. Ob die unveränderliche Topographie

als solche additiv aufgebaut ist oder nicht, das ist einer zugehörigen Gestalt sozusagen gleichgültig, und erst wenn die Topographie den Kräften der Struktur nachgäbe, würde daraus eine wichtige Angelegenheit. — Da wir nun voraussetzen, daß man für ein gegebenes Gestaltmaterial nahezu beliebige bedingende Formen willkürlich herstellen kann, so dürfen wir in der Regel die Topographie als (im gewöhnlichen Wortsinn) „zusammenzusetzendes" physisches Beieinander, als eine summative Gruppierung im Raum ansehen. Deshalb darf auch der Begriff „Teil" in seiner gewöhnlichen Bedeutung gegenüber physischen Formen als solchen angewendet werden. Gehen wir z. B. auf den Anfang unserer Überlegungen (im ersten Abschnitt) zurück, so finden wir als bedingende Faktoren für das Entstehen elektromotorischer Kräfte zwei dissoziierte Lösungen, in welchen irgendwelche Ionenkonzentrationen ungleich sind. Diese beiden Lösungen als solche kann man in Berührung bringen oder trennen, kann also ein größeres Gebilde aus ihnen vorübergehend zusammensetzen und wieder aufteilen, ohne in kurzen Zeiten dabei an ihren Materialeigenschaften (den Bedingungen des Potentialsprunges) merkliches zu ändern. Nur den stationären Vorgang, der im Fall der Berührung durch osmotische und elektrische Kräfte zwischen ihnen geregelt wird und die elektromotorische Kraft ergibt, betrifft überhaupt die Gestaltfrage, nicht aber die bedingenden Umstände, welche man durch Angabe der Wanderungsgeschwindigkeiten und (konstanten) Konzentrationen auf beiden Seiten einfach herzählen kann. Bei der früheren Erörterung der Potentialsprünge sahen wir, daß der Begriff des Summativen nicht ohne weiteres auf jenen Fall anzuwenden war, daß die entstehende „Potentialdifferenz" nicht aus „artgleichen Eigenschaften der Teile" als Resultante abgeleitet werden konnte, während doch „zugleich etwas wie von Teilen, von Zusammensetzbarkeit o. dgl. an dem untersuchten System war". Das klärt sich jetzt einfach dadurch auf, daß die physischen Bedingungen gestalteter Zustände und Verläufe ihre begriffliche Behandlung getrennt von den Gestalten selbst erfordern, und daß einer additiven Behandlung jener physischen Topographie an sich und in der Regel nichts im Wege steht[1]). Die physischen Bedingungen für das Auftreten (und die Eigenschaften) eines Potentialsprunges haben in dieser Hinsicht nicht wesentlich andere Eigenschaften als z. B. diejenige Topographie, in welcher sich ein stationärer elektrischer Strom entwickelt. Abgesehen von dieser Strömung kann das ganze leitende System, es können aber auch die Teile von ihm wohl bestehen,

[1]) Unter diesem Gesichtspunkt lese man nun F. Krueger, Über Entwicklungspsychologie, S. 75 ff. 1915.

und diese Frage, ob es für sich additiv zusammengesetzt ist oder nicht, hat überhaupt mit der Frage der Strömungsgestalt unmittelbar nichts zu tun. — Wenn man sich daran gewöhnt, diese Scheidung von Gestalt selbst und bedingender Topographie stets zu beachten, dann fallen sofort störende Denkschwierigkeiten und anscheinende Widersprüche fort. Besonders auf nervenphysiologischem Gebiet werden wir von der damit erreichten Klärung Vorteile haben.

140. Man darf aber nicht etwa prinzipiell sagen, die bedingende Form einer Gestalt müsse in jedem Fall selbst ungestaltet, rein additiver Natur sein. Denn es ist sehr wohl möglich, daß eine Gestalt, die sich unter bestimmten Bedingungen entwickelt, ihrerseits wieder die bedingende Form für ein anderes Gestaltmaterial abgibt. Ein Beispiel zeigt, inwiefern das vorkommen kann: Eine Membran sei über eine feste (nichtebene) Randkurve ringsum gleichmäßig, und zwar unter starkem Zug, aufgespannt. Dann bildet sie eine physische Gestalt, für welche die Randkurve starre bedingende Form ist. Eine solche Haut wird von mäßigen Kräften nicht leicht deformiert, z. B. kann vernachlässigt werden, daß sie der Erdschwere unterliegt. Ist die Haut leitend, und führt man dem ganzen (isolierten) System eine nicht zu starke Ladung zu, so ist die Ausbreitung dieser Ladung elektrostatische Gestalt. Wenn die Membran sich dabei nicht merklich deformiert (durch die elektrostatischen Kräfte), so gehört sie zur bedingenden Form der elektrostatischen Struktur. Zugleich ist sie aber selbst elastische Gestalt. Bei der ersten Einführung des Begriffes „physische Form“ habe ich der Einfachheit und Klarheit wegen kurz vorausgesetzt, die Form sei selbst kein gestaltetes Gebilde. Jetzt, wo mehrere Beispiele die Unterscheidung geläufiger gemacht haben, steht der Berücksichtigung auch solcher Möglichkeiten nichts mehr im Wege. Bei genauer Prüfung findet man ähnliches wohl häufiger. — Sehr viel komplexer wird das Verhältnis von physischer Form und Gestalt, wenn z. B. die gespannte Membran durch eine elektrische Ladung (deren elektrostatischen Zug) deformiert werden kann, bis die hierbei auftretenden elastischen Gegenkräfte der Umbildung eine Grenze setzen. Eine prinzipielle Denkschwierigkeit neuer Art entsteht jedoch hierbei nicht.

141. Wir zählen weiter auf, in welcher Weise reine Summationen auch auf Gestalten anwendbar bleiben.

Gestalten selbst sind als ganze addierbar, sobald eine jede von ihnen in sich abgeschlossen und von den übrigen unabhängig ist. Es hat einen vollkommen klaren Sinn, wenn man von einer Anzahl oder Summe je in sich geschlossener (ganzer) Strömungsgestalten spricht; und bei ausreichender Entfernung voneinander können auch ganze elektrostatische Strukturen als Posten einer reinen Summe behandelt werden. Dabei ist es irrelevant, ob die einzelnen Strukturen unter sich gleichartigen Bau haben oder nicht; selbst Gestalten ganz verschiedener Natur, wie stationäre Wärmeströme und elektrostatische Eigenstrukturen, darf man, wenn irgend ein Interesse dazu veranlassen sollte, in Summen des Typus „soviele Gestalten im ganzen“ zusammenfassen. Kurz, je in sich ge-

schlossene Gestalten, zwischen denen kein physischer Zusammenhang besteht, verhalten sich zueinander wie „Dinge", und zwar nur wie solche. Infolgedessen kann man sie auch rein additiv gruppieren, sofern dabei gewisse Bedingungen nicht verletzt werden, welche eine gegenseitige physische Einwirkung ausschließen.

142. Sogar innerhalb einer und derselben physischen Topographie lassen sich ganze Strukturen übereinanderlagern und so physisch, deshalb auch rechnerisch addieren. Ein solcher Fall ergibt sich z. B. ohne weiteres aus der Tatsache, daß elektrostatische Strukturen von dem Gesamtbetrag ihrer Ladung nicht abhängen. Ist $\sigma = f(x, y, z)$ die Eigenfunktion eines Leiters für die Gesamtladung 1, so gibt $\sigma' = (1+\varepsilon) f(x, y, z)$ die Ausbreitungsart auf gleicher Form für die Gesamtladung $(1+\varepsilon)$ an, wo $(1+\varepsilon)$ und also ε Konstanten sind (vgl. oben 41). Dies bedeutet aber nichts anderes, als daß die Struktur $\varepsilon . f(x, y, z)$ der ursprünglichen $f(x, y, z)$ additiv superponiert ist. Ganze und in sich geschlossene Gestalten auf derselben Form (die also notwendig unter sich gleiche Struktur haben) können auf dieser Form addiert werden. — Handelt es sich um mehrere Leiter, so ergeben sich noch andere Möglichkeiten solchen Superponierens von Strukturen auf einer gegebenen Topographie; davon ist in der speziellen Elektrostatik die Rede.

Unsere allgemeinen Ausführungen werden durch solche Möglichkeiten in nichts angegriffen, da stets nur ganze in sich geschlossene Strukturen so übereinander gelagert werden können, niemals von einem Zusammensetzen einzelner Momente die Rede ist. Die Regeln der Superposition sind vielmehr selbst Gestaltgesetze, schon weil sie von jedem Summanden verlangen, daß er für sich als Gestalt existenzfähig sei[1]).

143. Gestaltetes physisches Material ist stets als solches summierbar. — Wir betrachten eine große Anzahl von Elektrizitätsmengen je sehr geringen und auf engsten Raum konzentrierten Betrages, z. B. Elektronen, die weit genug voneinander entfernt sind und bleiben, um einander durch ihre Felder nicht zu beeinflussen. Dann enthält der Begriff ihrer Summe keinerlei Unklarheiten; er ist überdies unabhängig von der Geometrie ihrer Gruppierung. Stellen wir uns nunmehr den Gesamtraum, welcher der Vielheit zur Verfügung steht, so weit eingeengt vor, daß die einzelnen Elektrizitätsmengen einander auf ihren Bahnen bisweilen genügend nahekommen, um sich gegenseitig abzulenken usw., so tritt damit unzweifelhaft eine ganz neue Geschehensform an der Mannigfaltigkeit auf. Aber das schließt nicht im mindesten aus, daß wir nach wie vor die Summe der überhaupt vorhandenen Elektrizität in vollkommen klarer mathematischer Operation bilden und sie z. B. für unabhängig von allen Verlaufsformen im System erklären. Werden endlich alle Elektronen gezwungen, auf einer leitenden, aber von Nichtleitern begrenzten Form zu bleiben, welche nicht allzu groß ist, und auf welcher deshalb alle Elektronen vom

[1]) Besondere Bedeutung kommt der Superposition von Gestalten auf dem Gebiet periodisch-stationären Geschehens zu.

Felde aller übrigen merklich abhängen — das ist bereits der Fall der starken Gestalten —, so besteht kein Anlaß, weshalb der Sinn der Summation verändert oder verloren gegangen sein sollte. Die Feststellung des reinen Betrages als solchen ist noch immer unabhängig davon, ob eigene Gesetze überhaupt und welche etwa die Gruppierung des Gesamtmaterials bestimmen.

Was für die Gesamtladung gilt, bleibt von kleineren Beträgen richtig, welche in jener enthalten sind. Daß die Ladungen, welche auf beschränktem Gebiet der Topographie sich finden, nach einem Gesetz für das Totalsystem dort ausgebreitet sind, und also nicht selbständig für sich dem beschränkten Gebiet der Form angehören, kann uns nicht hindern, sie in einem solchen Bereich als Beträge einfach zu addieren (zu integrieren), wenn das ein wissenschaftliches Interesse erfordern sollte.

144. Denken wir uns endlich eine Anzahl „geladener Punkte", auf welchen die Elektrizität keine merklichen Verschiebungen erfahren kann, irgendwie an bestimmten, übrigens willkürlich gewählten Stellen fixiert, so ist überall im Raum das Potential (und ebenso die Feldstärke) die Summe der Potentiale (und der Feldstärken), welche dort die einzelnen Ladungen erzeugen. Von einer Gestalt kann hier kaum die Rede sein; denn alle Ladungen werden ja von fremden (außer-elektrischen) Kräften in ihren Punkten festgehalten, sind künstlich dem gegenseitigen Einfluß entzogen. Haben wir es aber mit der Eigenstruktur einer Ladung auf vorgeschriebener ausgedehnter Form zu tun, so gilt noch immer der Satz, daß an jedem Punkt außerhalb und innerhalb Potential und Feld die Summen der Potentiale und Felder sind, welche die Elektrizitätsmengen sämtlicher kleinerer Bereiche (im Extrem: die Elektronen) an den betreffenden Punkten erzeugen. (Für Felder ist dabei die Vektoraddition gemeint.)

145. Das sind die Anwendungen des Summationsprinzips, welche an oder bei Gestalten zulässig bleiben. Daß physische Gestalten nicht als „bloße Undverbindungen" aufgefaßt werden dürfen, schließt also in mehrfacher Hinsicht additive Operationen nicht aus. Wir haben danach zweitens zu fragen, worin physische Gestalten mehr sind als Summen. Diese Frage ist sinnvoll; denn die logischen Eigenschaften von überhaupt addierbarem Material weisen in nichts über sich hinaus, es folgt aus ihnen nichts darüber, ob an den gleichen Gebilden noch ganz andere Seiten als irgend ein „Summiertwerden-Können" zu unterscheiden sind oder nicht, insbesondere wird dergleichen durch das additive Prinzip keineswegs logisch verhindert.

146. Reine Summen (Undverbindungen) der physischen Welt sind durch vollständige Unabhängigkeit der Summanden voneinander charakterisiert. Jeder der Summanden kann für sich bestehen und darf deshalb gegenüber der Summe als im logischen Sinn „früher" angesehen werden. Die reine Summierungsoperation ist den Summanden gegenüber sekundär und durch keinen sachlichen, in den Objekten liegenden Grund gefordert; es liegt nur „an uns", unserer momentanen Denkrichtung, ob und was wir in dieser Weise zusammenfassen.

Bei vollständiger Unabhängigkeit der Summanden voneinander (also in reinen Summen) ist ihre Gruppierung (relativ zueinander) rein geometrisch und ermangelt einer objektiven, in der Sache liegenden Bedeutung; das folgt unmittelbar aus der Möglichkeit, Beliebiges wie in die Summe so damit in die Gruppierung aufzunehmen oder von ihr auszuschließen. Die Gruppierung in reinen Summen ist logisch sekundär gegenüber den Orten der Summanden.

147. Mit diesen Begriffen der reinen Summe oder der Summandengruppierung kann unmöglich dasjenige an physikalischen Systemen ausreichend behandelt werden, was überhaupt Gegenstand der Naturwissenschaften ist, ja man kommt mit ihnen kaum an die Natur solcher Systeme heran. Die Feldstärke an einem Punkt in der Nähe eines geladenen Leiters stellt wohl die Resultante der Felder dar, welche die sämtlichen Ladungen kleinerer Bereiche (über die Leiterfläche hin) dort erzeugen. Aber von diesen „Einzelbeträgen zum ruhenden Feld an jenem Punkt" besteht so in Ruhestruktur keiner ohne die übrigen, und das Feld an diesem Punkt hat nur insofern keine Verschiebungstendenz, als das übrige Feld im ganzen und durchweg eine entsprechende Struktur ausmacht. Die Ladung im ganzen ist die Summe der Ladungen in kleineren Bereichen, aber ein objektiver, in der Sache liegender Umstand veranlaßt uns, gerade diese Summe zu bilden, weil deren Summanden noch ganz anderes miteinander zu tun haben, als daß sie summieren kann, wer will.

Der Summand einer reinen Summe physischer Objekte ist für sich an seinem Ort, und nichts an ihm weist auf die übrigen Summanden hin. In gestaltetem physischen Material[1]) ist der Zustand an jeder Stelle nach festem Gesetz abhängig von dem an den übrigen Stellen. Jeder örtliche Materialbetrag übt durch sein Vorhandensein an allen Orten des Gestaltbezirkes, an dem übrigen Material physischen Einfluß aus und umgekehrt. Infolgedessen

[1]) Das Wort „Material" ist hier überall in so allgemeinem Sinn zu verstehen wie früher. Es bedeutet alles, was gestaltet auftritt, also gar nicht immer „Materielles", Stoffartiges".

geschieht im Prinzip nichts und „ist“ nichts an einem Ort der Gestalt, was nicht den ganzen Gestaltbereich durchweg anginge, wenn schon der Grad dieses Zusammenhanges nicht zwischen allen Orten der gleiche ist (vgl. oben 39, 110). Dem Gesetz dieses durchgehenden Zusammenhanges und den unveränderlichen Bedingungen einer gegebenen Topographie gemäß muß sich also die gesamte Materialgruppierung verschieben, bis der Einfluß, welcher von jedem Punkt her an einem jeden anderen auf eine Verschiebung hindrängt, überall im ganzen auf gleiche und entgegengesetzte Einflüsse trifft, und also das ausgedehnte Gebilde „sich in sich trägt“.

148. Den Weg zu untersuchen, auf dem diese Verschiebung erfolgt, ist Aufgabe einer Theorie dynamischer Verläufe. Da aber die Bedingung des Endzustandes gar nichts über die örtlichen Einzelbeträge für sich aussagt, sondern allein auf ihr Zueinander im System geht, so muß sie ein Totalgesetz für den ganzen gestalteten Bereich sein. Weiß man erst, was eine zeitunabhängige physikalische Gestalt ist, so kann man in der Tat diesen Charakter an der Art ihres Gesetzes unmittelbar erkennen. Denn jedesmal handelt es sich um eine Forderung, nach welcher die Ausbildung des örtlichen Zustandes (der Momente) einen eindeutig bestimmten Gesamtzustand ergeben muß. Das in sich dynamisch zusammenhängende Gestaltmaterial verschiebt sich spontan und fortwährend als Ganzes in der Art, welche am Ende in die entsprechende zeitunabhängige Ausbreitung übergeht[1]).

Wir sahen, daß dies der Charakter der allgemeinsten thermodynamischen Gleichgewichtsbedingung für ein geschlossenes System ist (vgl. oben 32 ff.), insofern die Entropie eines ausgedehnten Gesamtbereiches im ganzen ein Maximum werden muß, und dieser Zustand sich unter Steigen und Sinken der Entropien in Einzelbereichen ausbildet. — Auf einem geladenen Leiter hören die Verschiebungen nicht dann auf, wenn an örtlichen Beträgen einzeln irgend eine Bedingung erfüllt ist, sondern wenn der ganze Leiter räumlich konstantes Potential hat; und diese Forderung sagt gar nichts Summatives aus, sondern ist ein einfaches Gesetz für das Zueinander lokaler Zustände im ganzen und in einer maßgebenden Hinsicht. — Die gespannte Membran nimmt eine Gestalt derart an, daß die Gesamtfläche dabei so klein wie möglich wird, und so, daß diese Bedingung im ganzen erreicht wird, krümmt sie sich eben in allen einzelnen Bereichen. Das Gesetz ist nicht reduzierbar auf unabhängige Einzelgesetze für Einzelgebiete. — Der elektrische Strom fließt stationär durch ein System in einer

[1]) Hier ergibt sich also ein erster Ausblick auf die räumlichen Gestalteigenschaften dynamischer Verläufe.

Struktur, welche der vom Gesamtvorgang erzeugten Wärme den kleinstmöglichen Wert gibt; dieser Bedingung für die ganze leitende Form gemäß entwickelt sich die Stromausbreitung an allen Orten (vgl. unten Abschnitt IV, Kap. 5).

149. Der Gruppierung von Summanden in einer reinen Summe steht die Ausbreitung des Gestaltmaterials in örtliche Momente (d. h. seine Struktur) als sehr viel reicherer und vor allem als ganz objektiv-sachlich bestimmter Begriff gegenüber. Da dieses Material als endliche zusammenhängende Gesamtheit und in Abhängigkeit von einer endlichen Topographie im ganzen seine Struktur annimmt, so ist damit eine physisch-natürliche Ursache gegeben, welche uns veranlaßt und zwingt, gerade eine solche Gesamtheit als Einheit hinzunehmen. Und ich sage nicht „zusammenzufassen", weil dieses Wort noch an die Willkür erinnert, mit welcher wir irgendwelche, gegenseitig unabhängige Posten zu reinen Summen zusammendenken, wann und wie es uns beliebt. Das Gestaltgesetz, dem ein solches Material folgt, und die spezifische Struktur, welche jedesmal gerade diese Gesamtheit objektiv und spontan annimmt, schreiben uns vor, was wir da „als eines" anerkennen müssen.

150. Wie aus alledem unmittelbar hervorgeht, sind Momente einer Struktur oder Gestalt sehr im Unterschied zu den Posten einer geometrischen Gruppierung nicht logisch früher als die totale Struktur selbst; denn im zeitunabhängig gestalteten Bereich bestehen sie ja nur als Gesamtheit. Und wie es nicht „von uns" abhing, sondern objektiv-sachlich bestimmt wurde, was wir in einem solchen Fall als Einheit anzuerkennen haben, so stellt auch die jedesmal spezifische Ausbreitungsart dieser Einheit eine Realeigenschaft der Gestalt dar, nicht eine willkürlich auch anders zu wählende Zusammenfassung „von uns". Sachlich und objektiv ist es widersinnig, bei einer Betrachtung, welche überhaupt auf die Struktur der Gebilde achtet, etwa Momente aus ganz verschiedenen voneinander getrennten Gestalten denkend zu vereinigen und dafür die Momente einer und derselben Struktur gedanklich auseinander zu trennen. Es ist sachlich und objektiv falsch, das Moment einer Struktur denkend zu behandeln, als wäre es ein selbständiger Teil, als befände es sich so an seinem Ort auch ohne die Gesamtstruktur. Es ist sachlich und objektiv widersinnig, eine Struktur zu behandeln, wie eine geometrische Gruppierung, in der jedes Element und sein Ort als unabhängig variierbare Faktoren gelten können. Eine physische Struktur auf gegebener Topographie ist nicht logisch sekundär gegenüber ihren Momenten[1]).

[1]) Ich breche hier die begriffliche Erörterung ab, obwohl ich sie als unvollendet erkenne. Es liegt in der Natur der in dieser Schrift befolgten

151. Auf das alles glaube ich nun oft und eindringlich genug hingewiesen zu haben, zumal von Sachverhalten die Rede ist, die in der am weitesten entwickelten empirischen Einzelwissenschaft als selbstverständlich gar nicht mehr auffallen. In der Physik erzwingt die Erfahrung, daß man im gegebenen Fall gestaltmäßig denke (selbst wenn man nicht besonders darauf achtet). In Wissenschaften dagegen, welche sich entweder der Erfahrung, und besonders der naturwissenschaftlichen, fernhalten wie die gegenwärtige Philosophie, oder aber nur schwer sichere und deshalb unbefangene Beobachtung an ihren Gegenständen vornehmen können, wie Psychologie und Biologie, fehlt jener Druck undiskutierbarer Erfahrung, und mittlerweile wird ein Denken, welches reinen Summen gegenüber am Platze ist, um einer vermeintlichen Strenge willen überall angewandt. So behauptet z. B. ganz neuerdings ein Psychologe, „es stehe in unserem Belieben, den Einheitsbegriff auf Vielheiten oder auf Teile dieser Vielheiten anzuwenden", und deshalb „könnten wir bald in der Vielheit mehr sehen als eine bloße Summe, bald aber auch bloß die Summe der Teile". Man war bisher nur in der Lage, solche Aussprüche für unrichtig zu halten, und mußte noch darauf gefaßt sein, sein Urteil als Ausdruck ungeklärter Modevorstellungen abgelehnt zu sehen; die Physik lehrt uns, wie wir dem Gegner seinen Fehler demonstrieren. Vielleicht dürften die Psychologie und ihr nahestehende Wissenschaften dann eine etwas schnellere Entwicklung nehmen, wenn man auf derartige Behauptungen als schwer begreifliche Irrtümer der Vergangenheit zurückblicken wird.

152. Fern von einer sicheren Erfahrung ist der Fehler leicht gemacht. Denn wer nicht konkrete Beispiele vor Augen hat, sondern im allgemeinen und blassen Vorstellen erwägt, wie wohl ein physisches Material sich verhalten und wie es gruppiert sein könnte, der operiert dabei unversehens nicht mit adäquaten Repräsentationen des Gemeinten, sondern mit Denkgegenständen, z. B. vom Range der Zahlen, der rein geometrischen Gegenstände, der „Dinge"; den örtlichen Beträgen des Gedachten fehlt also dabei der dynamische Einfluß an allen übrigen Systemstellen und umgekehrt; alles postiert sich ohne viel Widerstand, wird zusammengefaßt und getrennt „nach unserem Belieben". So fällt aus dem Nachdenken gerade das heraus, was ein physikalisches System als solches auszeichnet, und es bleibt eine Art geometrische Ruhe oder geometrische Bewegung selbständiger Teile nach. Für

---

induktiven Methode, daß sie allein nicht zu voller systematischer Klarheit führt. Diese wollte ich nicht einmal anstreben, solange die Frage nach dynamischen Gestalten noch nicht induktiv untersucht ist.

dergleichen spricht man dann einen Satz aus, der vom aktuell Gedachten zutrifft, aber die Gegenstände ganzer Wissenschaften dabei außer acht läßt. Daß Descartes diesen Fehler machte und dazu neigte, die physisch-dynamische Welt in eine rein geometrische gedanklich zu entwerten, ist sehr begreiflich, da die Physik ausgedehnter und in sich zusammenhängender Systeme zu seiner Zeit noch fast unbekannt war; aber wir haben diese Entschuldigung nicht mehr, sondern machen denselben Fehler nur, weil wir unsere philosophischen Überlegungen fern von der physikalischen Erfahrung anstellen, und deshalb wie im Nebel ohne Kontrolle darüber sind, auf was für Gebiet wir uns eigentlich bewegen und was für Material wir denken.

Weshalb dabei eine so starke Tendenz besteht, unvermerkt gerade undynamisch-geometrisch und summativ vorzugehen, auf jeden Fall absolute Stücke als das Prius in jedem gedachten Gebilde anzusetzen, muß die Erkenntnispsychologie untersuchen. Noch einmal aber sei schon hier daran erinnert, daß die „Dinge" unserer Umgebung sich gegeneinander zumeist, und wenigstens für unsere passive Alltagserfahrung, summativ verhalten, also nicht in für uns merklichem Maße physikalische Systeme miteinander bilden.

153. Diese Gedankenrichtung ist in der europäischen Wissenschaft seit langem von größter Bedeutung. In der Art wie Huyghens das „Oszillationszentrum" von ausgedehnten schwingenden Pendeln bestimmte, lag implizite ein dynamisches Totalgesetz für das Verhalten der Systeme im ganzen (Theorem der lebendigen Kräfte). Aber „das Prinzip, welches Huyghens angegeben hatte, wurde von seinen Zeitgenossen mit allgemeinem Mißtrauen aufgenommen"[1]). Kein Wunder, da schon das Prinzip der virtuellen Verschiebungen als Totalgesetz für die Ruhe ausgedehnter mechanischer Systeme eine gewisse intellektuelle Unruhe erzeugte oder bestehen ließ. Lagrange muß dergleichen, wohl mehr an anderen als an sich, gespürt haben. Deshalb zeigte er durch ein glänzendes Gedankenexperiment, wie der durchgängige Zusammenhang im System sozusagen auf einen einzigen Indikator übertragen und dabei das Totalgesetz anschaulicher und einfacher als notwendig erkannt werden kann[2]). Unsere geistige Kraft, einen durchgehenden dynamischen Zusammenhang in ausgedehnten und vollends in stetig ausgedehnten Systemen und Materialien adäquat vorzustellen, ist recht gering. Noch heute gibt es Theoretiker, welche die Minimalprinzipien der Physik, Totalgesetze für räumlich-zeitlich ausgedehntes Geschehen als vollgültig nur ungern anerkennen.

---

[1]) Mach, Mechanik, S. 247 (der französischen Ausgabe).
[2]) Derselbe, ebend., S. 66 ff. (der französischen Ausgabe).

Physik und Produktionstheorie.

154. Wir haben zu Anfang von einem anscheinend extrem gestaltmäßigen Gedanken gesprochen, der in seiner Verschwommenheit die eigentlich faßbar und in scharf bestimmter Art gestalteten Gebilde unbeachtet läßt, der These vom universalen Weltzusammenhang. Eine andere Gedankenbildung erkennt in ihrer Weise ausdrücklich „Gestalten" begrenzten Bereiches an, und unterscheidet sich doch prinzipiell von der Gestaltheorie, das ist die Theorie der „fundierten Gebilde" (vgl. oben 22). Für sie ist gerade entscheidend das Festhalten an den Grundlagen rein geometrischen Denkens: Eine Gestalt soll sich stets aufbauen über Elementen, welche, an und für sich voneinander unabhängig, beliebig postiert werden können, also reine Teile und Stücke darstellen, über denen jedoch durch einen besonderen und sehr eigenmächtigen Prozeß der Produktion höhere Gebilde entstehen, ohne im Prinzip jene dabei zu ändern. Diese Theorie ist freilich gar nicht dazu bestimmt, eine physische Anwendung zu finden, ganz im Gegenteil heißt es, nur in dem höheren Reiche des Geistigen komme die merkwürdige Produktion und die spezifische Einheit des Produktes vor; die Leistungen des Physischen oder gar Physikalischen reichten an dergleichen nicht heran. Man hält sogar den Satz für evident, daß es physische (reale) Gestalten überhaupt nicht geben könne. Nach den Untersuchungen dieser Schrift ist sehr wahrscheinlich einzuräumen, daß auf die angegebene Weise durch einen Produktionsvorgang über unveränderten und gänzlich selbständigen Elementen willkürlich erzeugte Gebilde nicht im Bereiche der Physik zu finden sind. Mindestens gegenüber den hier als Gestalten in einem sehr realen Sinne erkannten Gebilden ist die Fundierungstheorie nicht wohl anwendbar.

Für phänomale optische Wahrnehmungen z. B. besagt diese Lehre, sogenannte lokale Empfindungen seien die selbständigen, voneinander und von dem Produktionsprozeß prinzipiell unabhängigen Bewußtseinselemente, welche der intellektuelle Produktionsvorgang „zu Ganzen zusammenfasse". Wäre das richtig, dann hätten wir offenbar in aller Bemühung auf physikalischem Gebiet noch gar nichts erreicht, was für das Verständnis der phänomenalen Gestalten eine Hilfe bedeuten könnte. Denn das gesamte gestaltete Material durchweg fanden wir gemäß seinen Bedingungen im ganzen jedesmal spezifisch ausgebreitet, und die lokalen Momente des Zustandes oder Geschehens, welche sich dabei entsprechend einem Totalgesetz des Gebildes lagerten, haben gewiß nichts von der Selbständigkeit und Priorität solcher „Bestand-

stücke". Die physische Form aber oder der Komplex von Bedingungen — mit denen man allenfalls zweitens die Empfindungen in Analogie bringen könnte — sind zwar von der Gestalt selbst unabhängig, lassen aber durchaus nicht Beliebiges in sich entstehen, sondern schreiben von ihrer Konfiguration im ganzen aus dem Zustande oder Geschehen (bei sonst konstanten Umständen) eine bestimmte Struktur eindeutig vor. Eines besonderen Produktionsaktes, der von den Bedingungen und dem Material unabhängig wäre, bedürfen sie hierzu nicht.

155. Aber eben erst hat Koffka in eindringender Untersuchung der Voraussetzungen dieser Theorie ihre Abhängigkeit von sehr angreifbaren Hypothesen deutlich aufgewiesen [1]). Die Lehre von den fundierten Gebilden ist keine „beschreibende Theorie" im Sinne Stumpfs. Hypothetisch angenommen ist der Charakter der Empfindungen, welche als starre Bestandstücke unterste bewußte Träger oder Objekte der Produktion sein sollen, und hypothetisch ist der willkürlich, genau wie an summativen Mannigfaltigkeiten zusammenfassende Produktionsprozeß selbst, welcher die Summanden erst „in Realrelation bringen muß". Mangel an Übereinstimmung zwischen dieser Lehre und den gefundenen physikalischen Gestalten braucht also gar nicht in dem Sinne gedeutet zu werden, als hätten wir für die Zwecke der Psychologie doch nichts Geeignetes erreicht; denn der Grund kann ebensogut darin liegen, daß die Hypothesen der Produktionstheorie unglücklich gewählt sind, während die phänomenalen Gestalten sich sehr wohl von den Gestalten des physikalischen Gebietes her oder mit ihnen zusammen verstehen lassen. Das ist um so wahrscheinlicher, als jene Theorie die Möglichkeit solcher Geschehens- und Zustandsarten, wie sie hier besprochen wurden, überhaupt nicht erwähnt oder erörtert, also nicht etwa auf eine Prüfung hin diesen Weg vermieden hat. Unsere Aufgabe ist deshalb nicht von der Produktionstheorie aus festgelegt, sondern Maß und Ziel der Forschung geben unmittelbar diejenigen Erscheinungen ab, welche ein sachliches Problem der Gestalten schaffen.

---

[1]) Zeitschr. f. Psychol. **73**, 11 ff., 1915.

Abschnitt IV.

Erste Anwendung auf psychophysische Gestalten.

Erstes Kapitel.

„Denn was innen, das ist aufsen."

156. Von der Beobachtung ruhender und dynamischer Phänomene im Gesichtsfelde wurde Wertheimer zu der Hypothese geführt, daß (in somatischen Feldern) „nicht die Erregungsvorgänge in den erregten Zellen selbst ... oder die Summe dieser Einzelerregungen das einzig wesentliche sind: sondern daß eine wichtige und für manche Faktoren direkt wesentliche Rolle charakteristischen Quer- und Gesamtvorgängen zukomme, die aus der Erregung der Einzelstellen ... als spezifisches Ganzes (größeren Bereichs) resultieren". In diesem Sinne ist weiter von einem „einheitlichen Gesamtprozeß" die Rede, der eine „physiologische Gesamtform" besitzt, und „dessen charakteristische Art als Ganzes für weitere Wirksamkeiten entscheidend" wird[1]).

Da unter den physischen Gebilden, welche dem Psychologen geläufig sind, „spezifische Ganze größeren Bereichs", „einheitliche Gesamtprozesse" und „physische Gesamtformen" nicht vorkommen, die auch „als Ganze charakteristisch wirksam werden" könnten, so entstand die Sachlage, von welcher diese Schrift ausgeht, d. h. die Frage: Gibt es überhaupt physische Gebilde von den angeführten Eigenschaften?[2]). Nachdem die vorigen Abschnitte gezeigt haben,

---

[1]) Sehen von Bewegung, Frankf. Hab. Schr. 1912, S. 91 f. Man vergleiche die glänzende Darstellung dieser gegenüber der Produktionstheorie der Gestalten bei Koffka, Zeitschr. f. Psychol. 73, 11 ff., insbesondere S. 56 ff. — In einem Punkte glaube ich noch etwas radikaler sein zu müssen als Wertheimer in der Schrift von 1912 (vgl. das folgende Kapitel, 188 Anm.).

[2]) Mit dieser Frage wendet man sich aus Gründen, welche in der Einleitung erwähnt sind, von selbst und zuerst an die Physik. Die Bedeutung des Problems: Gibt es physikalische Gestalten? haben, wie ich weiß, von Ehrenfels, Wertheimer, Cornelius, von Hornbostel, Koffka vollkommen erkannt.

daß sogar in der Physik des Anorganischen Zustände und stationäre Vorgänge genug zu finden sind, welche unzweifelhaft „spezifische Ganze“ mit einer physischen „Gesamtstruktur“ [1]) und von ihr abhängenden „charakteristischen Strukturwirkungen“ darstellen, ist dieses Problem gelöst. Anstatt die spezifischen Züge gewisser phänomenaler Gebilde zu Unrecht ins Physische abgebildet zu haben — wie manche meinten —, hat Wertheimer Grundeigenschaften physischer Gestalten angegeben, die sich an physikalischen Beispielen jederzeit und sehr genau aufweisen lassen. An der Problemlösung ist nichts Hypothetisches mehr; denn die Gestaltnatur der betreffenden Gebilde besteht unabhängig von Materialannahmen der Physik, welche Änderung oder gar Widerlegung ausgesetzt wären [2]).

157. Als Wertheimer-Problem soll kurz die Frage nach solchen physischen Gestalten bezeichnet werden, welche aus der Natur des Nervensystems abzuleiten, also jedenfalls in ihm möglich sind, und welche den Eigenschaften phänomenaler Gestalten entsprechen. Man muß nicht erwarten, daß sich dieses Problem auf Grund allein schon der bisherigen physikalischen Vorbereitung nun einfach und vollständig lösen ließe. Es kostet in diesem Falle ganz besondere Mühe, das unter wohlbekannten Umständen erfaßte Prinzip auf andere und von den einfachen physikalischen stark abweichende Verhältnisse zu übertragen. Herauszusondern, was man vorläufig vielleicht leisten kann, und die Fragen zu umgehen, welchen unsere Kräfte noch nicht gewachsen sind, wird da zur ersten Aufgabe. Unser Ziel kann einmal sein, die allgemeinen Eigenschaften phänomenaler Gestalten von ebenso allgemeinen Eigenschaften physikalischer Strukturen aus zu verstehen, indem wir zeigen, daß physische Gestalten, welche im Nervensystem auftreten und psychophysische Bedeutung erlangen, ganz analoge oder in einem weiten Sinne „parallele“ Beschaffenheit haben müssen wie die Gestalten der phänomenalen Wahrnehmung. Wir könnten uns zweitens vornehmen, genaue Einsicht in die Materialnatur derjenigen speziellen Geschehensarten zu gewinnen, welche wirklich im Nervensystem gestaltet verlaufen, die Kräfte u. dgl. im einzelnen festzustellen, die dabei wirksam werden, und so eine Physik der psychophysischen Gestalten durchzuführen. Unzweifelhaft gehört zur Lösung des Wertheimer-Problems, daß beides geschehe. Im folgenden aber wird zunächst vorzüglich die erste Aufgabe behandelt und nur für später die Lösung auch der zweiten vorbereitet.

[1]) Was Wertheimer die „physiologische Gesamtform“ des Prozesses nennt, ist natürlich als die „Gesamtstruktur“ der hier gewählten Terminologie zu verstehen, nicht als die „physische Form“ im früher definierten Sinne.

[2]) Vgl. oben 46, 49, 59, 61, 123.

158. Der Grund zu dieser Zurückhaltung liegt darin, daß für die Physik der psychophysischen Gestalten im einzelnen Voruntersuchungen notwendig werden, welche an und für sich nicht die Gestaltnatur der Geschehensarten überhaupt betreffen, sondern physikalische und physiologische Einzelfragen. Es handelt sich zum großen Teil um rein experimentell zu bearbeitende Tatsachenprobleme, und ich halte es nicht für angebracht, für eine von mehreren Hypothesen in dieser Richtung etwas willkürlich zu entscheiden, während der nervenphysiologische oder physikalische Versuch uns sichere Auskunft geben könnte. Welches die zum Glück nicht sehr zahlreichen Möglichkeiten sind, zwischen denen die Wahl offen bleibt, soll weiterhin kurz überlegt werden; aber damit, daß wir sie offen lassen, verzichten wir vorläufig auf die Ableitung von manchen Eigenschaften, welche gerade den im Nervensystem auftretenden Gestalten spezifisch eigen sein werden. Denn hierfür ist naturgemäß erforderlich, daß die Gestaltart (ihrem „Material“ nach) und daß der Charakter der wirksamen Kräfte genau bekannt sei; gerade darauf würden experimentelle Untersuchungen abzielen, welche ich zurzeit weder selbst vornehmen noch veranlassen kann.

159. Daß sich auch ohne genaue Kenntnisse der eben erwähnten Art aus den Ergebnissen der physikalischen Betrachtung gewisse Anwendungen auf das Nervensystem machen lassen, liegt an dem sehr allgemeinen Charakter gewisser Seiten des Gestalteten, von welchem wiederholt die Rede war. Sämtliche physikalischen Raumgestalten stimmen in wichtigen Eigenschaften trotz aller Materialunterschiede überein, und da diese Eigenschaften an den Beispielen aus anorganischem Gebiet mit Klarheit aufgewiesen werden können, so geht bei einer Übertragung auf nervöses Geschehen an Schärfe nicht viel verloren, wenn wir hinsichtlich der Materialnatur der speziellen Gestaltart keine Entscheidung treffen.

Bildlich gesprochen ist unser Vorgehen dem eines Physikers einigermaßen verwandt, der gegenüber einer neuen Erscheinung von nicht ganz bekannter Materialnatur jedenfalls das Gesetz von der Erhaltung der Energie und etwa den zweiten Hauptsatz als gültig voraussetzt, oder der theoretische Chemie auf thermodynamischer Grundlage treibt, obwohl er in keinem Fall die Natur der chemischen Elementarkräfte kennt.

---

160. Abgesehen von einigen Bemerkungen von Ehrenfels' und Witaseks, in denen die Möglichkeit besonderer, Gestalten entsprechender Prozesse irgendwelcher Art erwähnt wird, sowie von Theorien des retinalen Kontrastes wie derjenigen von G. E. Müller[1])

[1]) Zeitschr. f. Psychol. usw. **14**, 25 ff. — Auch die Heringsche Kontrasttheorie hat bereits dieselbe Grundrichtung (vgl. Nagels Handb. d. Physiol. III, **1**, 237 ff. [v. Kries]).

hat die Theorie der somatischen Felder vor Wertheimer rein summative Vorstellungen von der Natur des nervösen Geschehens entwickelt. Ausgedehnte Erregungen in nervösen Feldern sind danach die Summe von selbständigen lokalen Elementarerregungen, deren jede im optischen Gebiet z. B. aus einem örtlichen Farbprozeß und seinem „physiologischen Ortswert" besteht. In zentralen Feldern (Sehrinde) insbesondere schließt mit der Entstehung dieser lokalen Elemente der im engeren Sinne „physiologische" Anteil des Wahrnehmungsvorganges ab, zugleich sollen phänomenale Korrelate solcher Elementarprozesse, welche man Empfindungen nennt, die ersten Anfänge des bewußten Wahrnehmens darstellen. Scharf zu unterscheiden von diesem Unterbau schließen sich über ihm die höheren Faktoren des Wahrnehmungsvorganges an, welche durch den Namen der „psychologischen" ausgezeichnet zu werden pflegen, auch wenn man überzeugt ist, daß ihnen wie den Empfindungen physische Prozesse entsprechen. Höhere Faktoren, die zu der Summe der selbständigen Empfindungen (oder ihrer Korrelate) hinzukommen, sind Assoziationen aus Erfahrung, Aufmerksamkeit, welche sich begrenzten Gebieten der Empfindungsmannigfaltigkeit zuwendet, der früher erwähnte Produktionsvorgang, der die Elemente zu Gruppen zusammenfaßt, Urteile u. dgl. m.

161. Für unsere Zwecke und die physikalische Betrachtungsart ist das Wichtigste hieran: Bis hinauf zu den Prozessen, denen unmittelbar Empfindungen als erste Bewußtseinsdaten parallel gehen sollen, handelt es sich nach dieser Anschauung im Falle optischen Wahrnehmens um ebenso viele voneinander praktisch unabhängige Systeme, als lokale psychophysische Empfindungsprozesse, lokalen peripheren Reizen gemäß, jeder einzelne für sich im somatischen Felde zustande kommen sollen. — Eine sehr große Anzahl nebeneinander postierter physikalischer Systeme ohne gegenseitigen physischen Zusammenhang bezüglich ihrer inneren Zustände und Geschehensarten und deshalb ohne jedes physikalische Interesse im ganzen — das ist keine unmögliche Vorstellung. Man muß sich nur darüber klar sein, daß mit der Anerkennung dieser Hypothese eine zweite Möglichkeit von ganz ebenso gutem und realem Sinn und sehr viel größerem physikalischen Interesse ausgeschlossen wird, daß nämlich das Geschehen oder der Zustand in ausgedehnten Gebieten gemäß deren aktuellen Bedingungen im ganzen zustande kommen oder, was dasselbe ist, daß das somatische Feld ebensogut für Wahrnehmungsprozesse ein physikalisches System darstellen könnte. Den sachlichen Unterschied zwischen jenem und diesem Falle haben wir bei Betrachtung physikalischer Systeme in der anorganischen Natur genügend kennen gelernt, um die Wahl im einen oder dem anderen Sinne als fundamental für alles weitere,

insbesondere auch für die Entsprechung von Bewußtsein und psychophysischen Korrelaten anzusehen.

162. Man muß indessen sagen, daß die Entscheidung zugunsten sehr vieler und voneinander unabhängiger Lokalprozesse in ebenso vielen getrennten Systemen von der Forschung keineswegs nach wohlbewußter Erwägung beider Möglichkeiten vorgenommen wurde, sondern daß unser Denken ohne viel Berücksichtigung der zweiten die erste Ansicht wie eine Selbstverständlichkeit vorausgesetzt hat[1]). Das ganze gar nicht irgendwie unsichere Gebiet physikalischer Tatsachen, von welchem in den vorigen Abschnitten die Rede war, wird kaum irgendwo in der psycho-physiologischen Literatur erwähnt, selbst nicht von denjenigen Physikern, welche so großen Anteil an der Entstehung der psychologischen Wissenschaft hatten, und die Geschichte des Gestaltbegriffes in der Psychologie beweist hinlänglich, daß in der Tat die Eigenschaften in sich zusammenhängender physikalischer Systeme auch gedanklich keinerlei Einfluß ausübten: sonst hätten die Ideen v. Ehrenfels' und Wertheimers nicht als etwas unklare Neuerungen aufgenommen werden dürfen, und anstatt angestrengt nach irgendwelchen indirekten Erklärungen der gestalteten Phänomene und Wirkungsweisen zu suchen, hätten wir sogleich ihre Verwandtschaft mit jenen physikalischen Gebilden und Erscheinungen erkannt.

Hierauf muß ich aus zwei Gründen hinweisen: Erstens sind die neuen Gedanken mitunter wie eine Art Zumutung an das exakte Denken angesehen worden. Wenn aber das Denken der Physiker gegenüber in sich geschlossenen Systemen, dem Geschehen und den Zuständen in ihnen, als exaktes Vorgehen bezeichnet werden muß, dann ist vor allem Wertheimer, der sofort den Schluß von der Phänomenologie auf das entsprechende physische Geschehen zog, gerade mit Entschiedenheit zu dieser Richtung eines sehr exakten, weil sachgemäßen Denkens vorgedrungen. — Der zweite Anlaß zu jener Feststellung liegt darin, daß umgekehrt ein wissenschaftliches Verfahren, welches von zwei Möglichkeiten die eine nicht sieht und deshalb die andere wählt, auch durch ein Alter von mehreren Jahrzehnten und weiteste Verbreitung keinen Primat in sachlicher Hinsicht verdient. Wir sind nicht in der unangenehmen Lage, kühne Änderungen an einem festbegründeten, mit klarer Einsicht in alle Voraussetzungen aufgebauten Gedankengang vorschlagen zu müssen, sondern stellen die Forderung auf, daß in der Theorie des psychophysischen Geschehens eine Art physischer Gebilde, und zwar die an Eigenschaften und Wirkungen reichste und wertvollste Art, nicht grundlos gänzlich unbeachtet bleibe wie bisher. Im allgemeinen wird es für vorsichtiger gehalten, wenn man an einer älteren und tiefeingewurzelten Voraussetzung nach Möglichkeit festhält. Aber für diesen Fall kann das nicht gelten; denn es ist ohne Zweifel vorsichtiger, alle sachlich in Betracht

[1]) Ich erwähnte, daß es physiologische Kontrasttheorien einer weniger summativen Tendenz gibt. Aber da muß man auch beachten, welchem energischen Widerstand selbst dieser Anfang weiter ausschauenden Denkens begegnete.

kommenden Möglichkeiten zu erwägen, als wie hier, eine von zweien wie eine Notwendigkeit zu behandeln, nur weil man die andere gar nicht gesehen hat. — Wenn endlich das Alter einer Anschauung überhaupt mit ihrer sachlichen Einschätzung in irgend eine Beziehung zu bringen ist, so waren die wesentlichen Eigenschaften in sich zusammenhängenden physischen Geschehens in den exakten Naturwissenschaften schon erkannt, bevor noch die Behandlung des psychophysischen Geschehens ohne Rücksicht auf solche Eigenschaften, ehe also die gegenwärtig in der Psychologie verbreitete Denkart sich hatte ausbilden können.

163. Wir wissen bereits, daß die lokalen voneinander unabhängigen Empfindungsprozesse nicht auf Grund irgendwelcher unmittelbar entsprechenden Beobachtungen angenommen wurden. Die psychologische Erfahrung läßt, wenn wir uns nach der Phänomenologie des Gesichtsfeldes richten, dergleichen nicht feststellen; auf physiologischem Wege hat niemand so etwas gefunden. Also hätte allenfalls ein Schluß zu jener Annahme führen können, und wir sind verpflichtet, solche denkbare Begründungen zu prüfen. — Es ließe sich etwa anführen, daß von der Sinnesfläche bis zu zentralen Feldern oder daß überhaupt im Nervensystem nicht ein breit kommunizierendes anatomisches Substrat von dem nervösen Geschehen erfüllt werde, sondern ein Netzwerk von feinen und für weite Strecken gegenseitig isolierten Bahnen, daß von jedem Element der Sinnesfläche eine feste Neuronenkette zu jedesmal einem bestimmten Element somatischer Felder führe, und also der Aufbau des Nervensystems aus getrennten, auch dem inneren Geschehen nach voneinander unabhängigen Elementarsystemen sich histologisch zu erkennen gebe. Wenn wir irgend einen Nachweis hätten, daß alle an den maßgebenden Prozessen beteiligten Elemente der Sinnesfläche gegeneinander physisch streng isoliert wären, und daß das gleiche von den anatomischen Elementen in zentraleren Feldern gelte, daß also je eine Bahn von ihrem Ursprung bis zu ihren Enden von allen übrigen bezüglich des nervösen Geschehens vollkommen getrennt bleibe, dann wäre der Schluß berechtigt; es gäbe dann wirklich so viele physikalische Systeme und so viele selbständige Lokalprozesse, als solche einzelne Bahnen vorhanden wären. Wo aber ist der Beweis für eine solche Annahme? Und besteht auch nur in gewissen Niveaus, sagen wir wieder des optischen Sektors, eine funktionell, nämlich für das nervöse Geschehen, wirksame Verbindung der sonst getrennt verlaufenden Bahnen, dann kann schon keine Rede mehr davon sein, daß in den einzelnen Leitungswegen oder Feldelementen gänzlich selbständige Vorgänge verliefen. Denn dann haben wir es mit einem System zu tun, welches die allgemeinsten funktionellen Eigenschaften mit einer sehr weit getriebenen Verzweigung etwa elektrischer Ströme gemein hat, und wir wissen ja ganz genau, daß in einem solchen Falle

— durch die Vereinigungsstellen hindurch in einem einzigen physischen Zusammenhang — die Strömung sich als ganze und in jedem Zweige nach den Gesamtbedingungen regelt. Was von elektrischen Strömen gilt, bleibt für jede Geschehensart richtig, welche sich nicht gar zu langsam räumlich ausbildet, und die Geschwindigkeiten, welche im Nervensystem der Warmblüter vorkommen, sind zwar kleiner als manche physikalischen Geschwindigkeiten, aber sehr groß, wenn man sie (wie es hier sein muß) auf die zu durchmessenden Strecken bezieht. Es gibt keinen Beweis für die absolute funktionelle Trennung je einer Neuronenkette von allen übrigen, vom Ursprung bis zu den Enden; dagegen gibt es genug Tatsachen, aus welchen im Gegenteil funktionell wirksame Verbindung in allen grauen Niveaus eines nervösen Sektors mit Sicherheit hervorgeht. Da sie aus der Physiologie des Nervensystems genügend bekannt sind, kann ich mich auf ein in diesem Zusammenhang wichtiges Faktum als Beispiel beschränken: Zwischen zwei ungleich gereizten Feldgebieten der Retina besteht eine elektromotorische Kraft, und das wäre ganz unmöglich ohne funktionelle (osmotische) Kommunikation der beiden irgendwie ungleich beschaffenen Elektrolyte (vgl. oben 11). Deshalb stehen auch nervöse Bahnen, die von den beiden retinalen Gebieten ausgehen, auf diesem Wege in funktionellem Zusammenhang, und wenn wir die elektrischen Kräfte, welche der sonst festgestellten Funktion des Auges vielfach auffällig paralleles Verhalten zeigen, nicht einfach vernachlässigen wollen, so kann sich also „in den Elementen“ hier und dort gar kein lokales Geschehen je für sich und unabhängig von allem übrigen ausbilden. Niveaus, welche wie die Retina funktionelle Verbindungen in querer Richtung enthalten, gibt es aber für sensorische Sektoren stets eine Anzahl hintereinander, und damit schwindet jeder Grund zu der Behauptung, der Histologie wegen müßten wir streng voneinander getrennte Neuronenketten als unabhängige physikalische Einzelsysteme und wieder deshalb ebenso viele selbständige Empfindungsprozesse in lokalen Feldelementen anerkennen.

Diese Überlegung hat mit dem Gegensatz der Kontinuitäts- und der Kontiguitätstheorie nichts zu tun. Ob die Fibrillen ununterbrochen von einem Neuron in andere eindringen oder nicht, kurz, wie die histologische Grundlage des funktionellen Zusammenhanges beschaffen ist, das hat wenigstens hier noch keine Bedeutung; es genügt uns, daß es überhaupt eine funktionelle Verbindung in grauen Feldern gibt, und darüber sind sich beide Parteien einig.

164. Die Unabhängigkeit einzelner Neuronenketten (des Geschehens in ihnen und in einzelnen Feldzellen) voneinander dürfte vielmehr erschlossen worden sein, weil dann eine vorausgesetzte Funktionsart herauskam, als daß wirklich umgekehrt anatomische

Argumente auf die Selbständigkeit lokaler Empfindungsprozesse hingeführt hätten. Unser Gesichtsfeld macht — wenigstens in den Fällen, die wir gut beschreiben können — einen sehr geordneten Eindruck; bei normalem Auge und gesundem Nervensystem verschwimmt die Wahrnehmung nicht in sich, sondern zeigt scharfe, klare Gebilde. Einfache Beziehungen bestehen vielfach zwischen den Reizen (ihren Formen und Ausmaßen) und jenen Gebilden, so daß der Eindruck verstärkt wird, es herrsche strenge Ordnung im Zustandekommen der Phänomene und also auch ihrer psychophysischen Grundlagen.

Für die Gedankenbildung des Biologen würde es einen sehr gefährlichen Irrtum bedeuten, wollte er annehmen, daß ein ausgedehntes Geschehen von deutlicher und straffer Raumordnung entweder durch einen zugrunde liegenden Mechanismus erklärt werden müsse oder aber auf rein physische Weise überhaupt nicht zu begreifen sei. Die Hypothese der streng getrennten Neuronenketten und der je in einer von diesen erzeugten Empfindungsprozesse hat einen ausgeprägt mechanistischen Charakter. Wir schaffen zumeist eine beabsichtigte räumliche Ordnung in Maschinen, indem wir einzelnen Teilfunktionen ihre Orte vorschreiben und die Gruppierung der Vorgänge zusammensetzen. Wenn wir jetzt unseren Blick auf Organismen und das Geschehen in ihnen richten, so fragen wir gleich nach den Einrichtungen („angeborenen Mechanismen"), welche überall die organischen Funktionen in so auffallender Ordnung verlaufen lassen. Von einem System, in welchem nicht örtlichen Vorgängen einzeln ihre Bahn absolut vorgezeichnet ist, erwarten wir Unordnung, Ineinanderlaufen, Verschwimmen. — Der Inhalt der früheren Abschnitte besagt hiergegen, daß ausgedehnte physische Systeme ohne alle besonderen Einzelvorrichtungen strengste Raumordnung gemäß ihren jeweiligen Bedingungen aufweisen können, obwohl sie oder vielmehr weil und insofern sie durchweg funktionell zusammenhängen. Weil und insofern — denn diese Art strenger Raumordnung im ganzen beruht gerade darauf, daß jedes lokale Geschehen von den anderen, man möchte fast sagen „dynamisch weiß".

165. Das Wort „Unordnung" findet treffende Anwendung auf Physisches, wo eine Mannigfaltigkeit von Elementen im allgemeinen unabhängige Wege beschreibt, aber dabei für Augenblicke miteinander in physischen Zusammenhang kommt. Man hört oft sagen, die Physik erkläre physisches Geschehen mechanisch, „nämlich aus den Bewegungen kleinster Teilchen", und die Grundvorstellungen vielleicht keiner physikalischen Unterdisziplin sind so populär geworden wie die der kinetischen Gastheorie. Aber gerade der Umstand, welcher diese Anschauungen allgemein verständlich und deshalb eben allgemein bekannt gemacht hat, beschränkt auch ihre sachliche Anwendbarkeit in prinzipieller Weise: Die Bewegungen von Gasmolekülen sind

auf freier Bahn gegeneinander beliebig; deshalb unterliegt es Zufallsgesetzen, wann sie zusammentreffen und wie sie damit in kurzen Momenten einander beeinflussen; so kommt es, daß auch das Verhalten der ganzen Mannigfaltigkeit sich nach den Regeln des Zufalls bestimmt, und daß zugleich Unordnung ein wohl auf sie anzuwendender Begriff ist. Aber die unscharfe Redeweise von der Erklärung aus „Teilchenbewegungen“ ladet zu schlimmen Mißverständnissen ein. Weil kleinste Materialbestandteile, wie wieder jedermann weiß, auch in der übrigen Physik eine große Bedeutung haben, so macht sich der Fernerstehende leicht ein falsches Bild von der Naturanschauung des Physikers und meint in etwas oberflächlichem Hinschauen, mit den kleinsten Teilchen habe es nun überall ungefähr dieselbe Bewandtnis, und jedes Geschehen komme der physikalischen Betrachtung nach durch das selbständige Herumfahren von Elementen und ihr Zusammentreffen, also ungeordnet und zufällig zustande. Wäre das richtig, so dürfte man freilich gegenüber jedem Geschehen von straffer Raumordnung mit Recht die Frage aufwerfen, welche besonderen Mechanismen da die Unordnung verhüten, sowie gerade die bestimmte Ordnung schaffen und erhalten. Aber man macht auf diese Weise einen argen Fehler. Denn wenn schon auch außerhalb der kinetischen Gastheorie Elementarmengen des Physischen wichtig genug sind, und diese in kleinsten Dimensionen sogar wirklich ungeordnete Wärmebewegungen ausführen, so tritt doch, sobald jene Elemente dauernd dem gegenseitigen Einfluß in ausgedehnten Gebieten unterworfen sind, eine gänzlich neue und im Großen gemäß den Systembedingungen streng geordnete Geschehensart außerdem auf, deren Gesetze mit dem Zufall nichts zu tun haben. Leider muß man sich bei der Lektüre der neueren Philosophen hin und wieder davon überzeugen, daß manche von ihnen diesen fundamentalen Unterschied nicht immer beachten; „die Bewegungen kleinster Teilchen“ würden sonst eine weniger bedeutende Rolle in Ausblicken auf die Physik spielen. Aber freilich, wir haben es in der Psychologie nicht besser gemacht.

166. Auf die Raumwahrnehmungen angewandt, erhält das Wort „Ordnung“ einen besonderen Sinn, insofern es strenge und einfache Zusammenordnung mit der Geometrie der verursachenden Reize bedeutet. Daß diese Entsprechung im Extrem bestehe, hat in den Zeiten weniger genauer phänomenaler Beobachtung und Besinnung als selbstverständlich gegolten, und es wird noch heute manchen geben, welcher wie Galilei überzeugt ist, Farben usw. seien freilich subjektive Phänomene, aber die Eigenschaften des objektiven Raumes und die (makroskopische) Geometrie seiner optisch wirksamen Erfüllung nähmen wir, wenigstens im Prinzip und von bloßen Störungen der Projektion abgesehen, einfach wahr, „so wie sie wirklich sind“. Dazu gehört dann die unmittelbare Folgerung, daß Teile der gesehenen Gruppierung so unabhängig variabel sind wie Teile des geometrischen Raumes und seiner speziellen Formen. In der Tat verschiebt sich nicht alles und jedes im Gesichtsfeld, wenn in einer Reizkonfiguration Änderungen beschränkten Bereiches vorgenommen werden, für gewöhnlich pflegt dann vielmehr das gesehene Feld starke und deshalb praktisch zu beachtende Umbildungen ebenfalls nur in beschränktem Bereich

durchzumachen. Aber solange dem Phänomenalen als solchen nicht besondere Aufmerksamkeit gewidmet wird, ist man geneigt, auf ungenügende Erfahrung hin sehr viel weiter und zu der Anschauung überzugehen: bis in kleinste Elemente sei die Gruppierung im phänomenalen Felde zwar genau an die lokale Reizart und insbesondere Reizgruppierung gebunden, dagegen gänzlich unabhängig variabel gegenüber der gesamten Konfiguration der übrigen Reize und einer ihnen entsprechenden „phänomenalen Geometrie". Am Ende kommt man so zu Punkten des gesehenen Feldes, welche einzeln und genau Punkten des Reizraumes zugeordnet sind und in sich keine Gruppierung mehr aufweisen; den geometrischen Beziehungen des Reizraumes entsprechen ebenso genau „Beziehungen" der phänomenalen Punkte. Bestände diese Art Ordnung wirklich und wäre obendrein damit erschöpft, was von unseren optischen Raumwahrnehmungen zu sagen ist, dann könnten wir hier mit der sicheren These abschließen, daß zwar in der Physik Raumgestalten vorkommen, aber nicht in der Raumwahrnehmung des Menschen und auch nicht in psychophysischen Prozessen, die ihr zugrunde liegen; die Lehre von den selbständigen und rein lokalen Empfindungsprozessen folgte mit Notwendigkeit.

In der eben wiedergegebenen Voraussetzung über die Ordnung räumlichen Wahrnehmens liegt wohl der historisch entscheidende Anlaß zur Ausbildung der Empfindungslehre wie der hinzugehörigen physiologischen Hypothese. Sollte diese im Prinzip aufgegeben werden müssen, so scheint es, als würde damit unser ganzes Bild von der objektiven Welt plötzlich unsicher gemacht. Denn welche Art Entsprechung könnte klarer und zuverlässiger sein, als daß die Geometrie der Welt in reiner Punktgeometrie ihres gesehenen Bildes phänomenal wiedergegeben wird [1])?

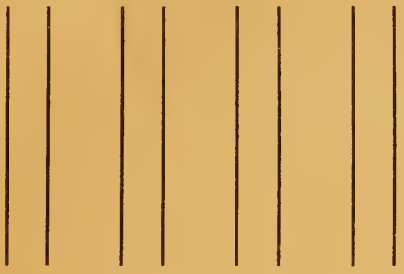
167. Die Theorie optischer Gestalten geht aus verschärfter Beobachtung hervor. Erstens hat der optische Raum sehr charakteristische Eigenschaften, welche so in keiner Geometrie der objektiven Reizelemente als solcher jemals vorkommen; was wir phänomenalen Raum nennen, ist in solchen Eigenschaften mit der reinen Geometrie von Reizen deshalb schlechthin unvergleichbar; und das bleibt bei jener Annahme ganz unbeachtet. Soweit aber in anderer Hinsicht ein Vergleichen und Beziehen möglich wird, gilt zweitens keineswegs jenes starre Punktgesetz, nach welchem bis in kleinste Gebiete die Gruppierung des phänomenalen Feldes an die lokale

[1]) So scheint es wenigstens auf den ersten Blick. In Wirklichkeit wäre eine Mannigfaltigkeit „phänomenaler Punkte" niemals ein „Bild", und erst Hilfsannahmen („Zusammenfassen", „Produktion") könnten allenfalls zu einem solchen führen.

Reizgeometrie absolut und an die Konfiguration der übrigen Reize, den Zustand des Feldes sonst überhaupt nicht gebunden sei.

168. Unsere Raumwahrnehmung zeigt das optische Feld nicht in gleichmäßiger Indifferenz der Bereiche (oder irgendwelcher Elemente) ausgebreitet, sondern das homogene Feld pflegt mit Annäherung gleichmäßig einheitlich (ohne „Punkte“ und deshalb ohne „Beziehungen“ zwischen solchen) zu erscheinen, und wo es sich um Gestalten im prägnanten Sinne handelt, da sehen wir in beschränkten Gebieten besonders fest geschlossene Gebilde, welche sich als „lebhaft“ und „eindringlich“ spontan von dem übrigen Felde „abheben“, obwohl zugleich das ganze Feld immer noch ein phänomenaler „Konnex“ bleibt.

Fig. 3.



So können wir in einfachen Gesichtsfeldern mit beträchtlicher Sicherheit „Figur“ und „Grund“ unterscheiden und vergewissern uns bald, daß mit dieser Gegenüberstellung zwei höchst konkrete und phänomenologisch reale Daseinsweisen des Optischen in beiden Gebietsarten getroffen werden [1]). In der optischen Wahrnehmung der Zeichnung erscheinen (den kleineren Abständen entsprechend) schmale „Streifen“ zusammengehörig wie eine Art Gitter, während zwischen ihnen und um sie gleichmäßig „bloßer Grund“ ist; man entdeckt, daß das Feld in den Streifen durch eine Art „Festigkeit“ und „lebhafteres Dasein“ vom „toten Grunde“ deutlich unterschieden ist, und bei etwas geübter Beobachtung und geeigneten Helligkeitsverhältnissen kann man dort, wo ohne begrenzenden Reizunterschied die festen „Streifen“ an den „bloßen Grund“ stoßen, eine Art spontaner Selbstbegrenzung der Streifen in Form einer schwachen (meist nach innen gekrümmten) Kurve sehen. Als objektive Reizgeometrie gibt die Zeichnung so und so verteilte Farben oder genauer: örtliche reflektierende Elemente, welche in allen möglichen Beziehungen zueinander stehen. Aber von diesen Beziehungen verdient keine den Vorrang vor der anderen, alle Punkte sind einander geometrisch gleich indifferent oder gleich beziehbar. Schmale Abstände haben als geometrische Distanzen vor großen Ab-

[1]) Vgl. E. Rubin, Die visuelle Wahrnehmung von Figuren (Ber. über d. VI. Kongreß f. exper. Psychol., S. 60 ff.).

ständen nichts voraus, die lokale Art der Reizung ist zwischen den enger benachbarten Linien dieselbe wie in den größeren Distanzen, und natürlich gibt es in einer geometrischen Reizkonfiguration als solcher keinen Gegensatz zwischen festen, lebhaften Gebieten und bloßem Grund [1]).

169. Wenn man an einem solchen etwas weniger trivialen Beispiel erkannt hat, was für merkwürdige Probleme der phänomenale Raum aufgibt, dann wird man auch in anderen Fällen darauf aufmerksam, daß Erscheinungen, die wir fortwährend als selbstverständlich hinnehmen, da sie fast in jeder optischen Wahrnehmung wiederkehren, eigentlich durchaus beachtenswert sind und jedenfalls aus einer bloßen Geometrie des phänomenalen Feldes unmöglich verstanden werden können. Füllen wir z. B. in einer sonst homogen grauen Ebene ein Gebiet von geometrischer Kreisform mit weißer Farbe aus, so sieht jedermann bei unbefangenem Hinschauen eben eine „Kreisgestalt“ auf dem Grau als ihrem „Grund“; tauschen wir die beiden Farbarten gegeneinander aus, so bleibt der Gestalteindruck derselbe: Inwiefern geht aus reiner Geometrie farbiger Elemente hervor, daß beschränkte gleichfarbige Bereiche in sonst homogenem Felde als feste Einheit, „Gestalt“ in einem prägnanten Sinne, daß ausgedehnte homogene Gebiete ringsum im Gegensatz dazu spontan als „Grund“ erscheinen? Das geht überhaupt nicht aus Geometrie hervor; denn in reiner Geometrie bilden ebensogut gewisse Gebiete des geometrischen Kreises und des Grundes zusammen die zu einem Rechteck erforderlichen Beziehungen, wieder andere die eines gleichseitigen Dreieckes usw., in reiner Reizgeometrie hat der Kreis nichts vor diesen Figuren voraus, und doch sieht jedermann, der unvorbereitet vor die Reizkonfiguration gestellt wird, eine Kreisgestalt und nicht diese Figuren. Daß gleichgefärbte beschränkte Bereiche von einfacher Form in besonderer Weise gegenüber anders gefärbter homogener Umgebung geschlossen, als feste Einheiten hervortreten, ist also eine Erscheinung unzweifelhaft außer- oder übergeometrischer Natur, welche wir aus Erfahrung, aber nur aus ihr kennen und aus keiner Geometrie des phänomenalen Feldes zu deduzieren vermöchten. Es hilft uns auch zu gar nichts, wenn wir da sagen, der menschliche Geist habe die Tendenz, das Gleichartige zusammenzufassen; denn dieser Satz stellt nur dasselbe Problem in allgemeinerer Form auf, gibt nicht die geringste Aufklärung, und was die intellektualistische Wendung anbetrifft, so finden wir z. B. im

[1]) Daß die erwähnten Erscheinungen nicht „durch Farbenkontrast“ erklärt werden können, ist schon ihrer Natur nach deutlich, läßt sich aber auch in geeigneten Versuchen sofort zeigen.

Falle des Kreises den Eindruck fertig ausgebildet, ehe die uns sehr wohl bekannte innere Aktivität eines Zusammenfassens oder Heraushebens hat auftreten können.

170. In der Physik freilich hat gleichartige Raumerfüllung neben ungleichartiger vielfach besondere reale Wirkungen und Eigenschaften; denn gleichartiges Material neben anderem verhält sich in elektrischer Hinsicht sehr charakteristisch, die Kohäsionskräfte zeigen sich von einem solchen Unterschied des physischen Rauminhalts in markanter Weise abhängig usw. Aber für die reine Geometrie irgendwelcher voneinander unabhängiger Reizelemente gibt es dergleichen nicht; sie wird von der Art der lokalen Färbungen überhaupt nicht beeinflußt. Nicht nur das Auftreten von „Gestalten" im prägnanten Sinne und im Gegensatz zum „Grund", ebenso auch der spezifische Zusammenhang solcher Gebilde mit farbigen Bestimmungen ist eine Eigentümlichkeit des phänomenalen Raumes, der etwas Gleichartiges im Reizraum als solchem nicht entspricht[1]). Um uns auf optisch-phänomenalem Wege die gedankliche Betrachtung zu erleichtern, zeichnen wir freilich für geometrische Beweise eine Figur einfarbig in sich und abweichend gefärbt von der Umgebung; aber dieses Vorgehen benutzt eben zur Betonung einer bestimmten Mannigfaltigkeit übergeometrische Eigenschaften des phänomenalen Raumes, und unser geometrisches Denkobjekt bleibt der Meinung nach genau dasselbe, auch wenn die Mannigfaltigkeit ebenso wie der übrige Raum oder in 100 Farbennuancen (wobei es phänomenal seine Festigkeit und Einheit verringert), oder wenn es überhaupt nicht gefärbt ist. Denn eine sachlich, objektiv begründete Zusammengehörigkeit kommt dem geometrischen Untersuchungsobjekt ja an und für sich in keiner Weise, deshalb auch nicht durch irgendwelche Färbungen seiner Elemente zu.

In solchen Verhaltensweisen ist also das gesehene Feld mit reiner Geometrie der Reize durchaus unvergleichbar. Es liegt nicht im Plane dieser Schrift, auf Phänomenologie genauer einzugehen, als unbedingt zum Verständnis und zur Sicherung unseres Gedankenganges erforderlich erscheint; aber bereits aus diesen Andeutungen ergibt sich zur Genüge, daß nicht hier und da, sondern immer phänomenaler Raum eine andere Konstitution hat als das, was wir unter rein geometrischen Mannigfaltigkeiten verstehen[2]).

171. In gewisser Weise aber läßt sich ein phänomenales Feld auf die geometrische Gruppierung von Reizen sicherlich beziehen,

---

[1]) Vgl. hierzu unten 181.

[2]) Vgl. auch Stumpf, Zur Einteilung der Wissenschaften (Berliner Akademieberichte 1907), S. 71 f.

und so kann geprüft werden, was es mit jener starren Ordnung und Koppelung von einzelnen Reizpunkten und Empfindungspunkten, von geometrischen Beziehungen der Reize und sogenannten Beziehungen im phänomenalen Raum auf sich hat. Es ist z. B. in gewissen geeigneten Fällen möglich, die „phänomenale Größe" von Strecken, Flächen usw. paarweise zu vergleichen. Wie es dabei zugeht, welch ein Geschehen dabei in uns stattfindet, ist eben nicht zu erörtern. Wäre jene Anschauung von der Ordnungsart im optischen Raume zutreffend, so hätten wir dabei äußerst einfache Gesetze zu finden, nämlich — weil die Abbildung nach Empfindungspunkten als ähnlich vorausgesetzt wird — diejenigen Beziehungen noch einmal, welche in der Reizgeometrie gelten (unter Einrechnung natürlich der rein projektiven Störungen). Die Erfahrung entspricht in Fällen, wo jenes Vergleichen überhaupt sinnvoll ausführbar ist, vielfach einigermaßen der Erwartung. Indessen wurden während des letzten Jahrhunderts ganze Gruppen von Erscheinungen entdeckt, wo von einer so einfachen Zusammenordnung von Reizgeometrie und z. B. „phänomenalen Größen" gar keine Rede sein kann. Die „geometrisch-optischen Täuschungen", deren Namen noch deutlich zu erkennen gibt, was für Anschauungen sich mit derartigen Befunden zuerst auseinandersetzen mußten, sind zu bekannt, als daß es einzelner Beispiele bedürfte. In ganz bestimmten Formen gewöhnlich demonstriert, lassen sie sich doch in so hohem Maße variieren, und es genügen so ganz ungefähre Bedingungen zur Erzeugung irgendwelcher solcher „Täuschungen", daß unzweifelhaft unser Sehen fortwährend dergleichen enthält, wenuschon wir sehr begreiflicherweise von einer „Anomalie" nichts ahnen[1]). Die Abweichungen von jener vorausgesetzten Ordnung betreffen nicht allein phänomenale Größen, auch phänomenale Richtungen u. dgl. m.; sie sind oft von geringem Betrag, können aber gesetzmäßig gesteigert werden und bisweilen ein ganz erstaunliches Maß, die kräftigsten Verzerrungen erreichen.

172. Die meisten (und zwar die hier zunächst allein wichtigen) Erscheinungen dieser Art widersprechen der punktmäßigen Zuordnung „phänomenaler Elemente" zur Reizgeometrie dadurch, daß die optische Gruppierung in beschränkten Bereichen sich deutlich von der Reizgeometrie in ausgedehnteren Gebieten bestimmt zeigt und mit dieser variiert. Solche „Täuschungen" werden also aufgewiesen, indem man feststellt: Eine bestimmte Reizkonfiguration — welche der Beobachtungs-

[1]) Selbst die stärksten Täuschungen wurden ja erst im 19. Jahrhundert entdeckt. Wer nicht von ihnen weiß, kann eben die Figuren betrachten, ohne daß ihm dabei irgend etwas auffällt.

klarheit wegen einfach gewählt wird — ergibt in sonst homogenem Felde gewisse phänomenale Eigenschaften, eine gewisse Gruppierung; sobald in der Umgebung geeignete lokale Reizformen hinzutreten, ändern sich jene Eigenschaften, jene Gruppierung, und das ist ein Verhalten, welches sofort an früher betrachtete physikalische Raumgestalten erinnert. Die experimentelle Forschung der neuesten Zeit ist schließlich zu ganz auffallenden Beobachtungen gelangt, indem sie die zeitlichen Verhältnisse solcher Reizänderungen planmäßig variierte. Da Phänomene eines optischen Bereiches auf geeignete Reizänderungen „an anderen Stellen“ gesetzmäßig mit phänomenalen Bewegungen aller Intensitätsgrade reagieren, da je nachdem, was sonst schon an Reizen auf das Feld wirkt, hinzukommende Phänomene an verschiedenen und also auch an „falschen“ Orten auftreten können, da während solcher Erscheinungen oft statt zweier zu erwartender Gestalten (im engeren Sinne) nur eine einzige im Felde ist usw., so besteht für die Erfahrung schlechterdings nicht mehr der vorausgesetzte starre Zusammenhang von einzelnen Phänomenpunkten mit einzelnen Reizpunkten, ebensowenig also die Unabhängigkeit jedes Feldgebietes von der übrigen Reizgeometrie.

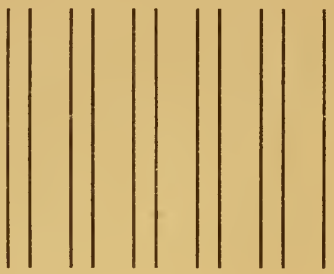
173. Damit aber ist zugleich nochmals gezeigt, in welchem Grade das phänomenale Feld der Konstitution nach mit seiner Reizgeometrie unvergleichbar ist. Auch wenn eine feste punktmäßige Entsprechung ein für allemal bestände, wäre es durchaus möglich, daß die Abbildung der objektiven in die Empfindungsgeometrie irgendwelche Verzerrungen zeigte. In diesem Falle müßte die Verzerrung am absoluten Ort oder Bereich haften. Dagegen zeigt die Beobachtung hier, daß im gleichen Bereich der phänomenale Bestand gesetzmäßig und stark variieren kann, je nachdem wie die Reizbedingungen für das ganze Feld liegen. Und ein solches Verhalten beweist in der Tat eindringlich dasselbe wie die zuvor erwähnten einfachen phänomenologischen Erfahrungen: das phänomenale Feld hat ausgeprägt übergeometrische Eigenschaften.

174. Mit übergeometrischen Eigenschaften meinen wir solche, denen Artgleiches in der Konstitution einer Reizgeometrie als solcher durchaus nicht entspricht. Wir sind dagegen weit von der Annahme entfernt, daß die übergeometrischen phänomenalen Eigenschaften nicht gesetzmäßig von den geometrischen der Reizkonfiguration bedingt würden[1]). Indem wir an einem Beispiel zeigen, welcher Art da diese Abhängigkeit ist, beweisen wir zugleich nochmals und direkt, daß die Beschaffenheit des phänomenalen Feldes in

[1]) Vgl. Koffka, a. a. O., S. 33 ff.

beschränkten Bereichen sich nach der Reizgeometrie in großen Gebieten bestimmt. Wir modifizieren zu diesem Zwecke die Fig. 3 in 168. Diese zeigte bei passivem Hinschauen eine Art Gitter von schmalen festen Streifen (der „Gestalt" im engeren Sinne) gegenüber dem relativ unlebendigen „Grund" ringsum und dazwischen. In der neuen Figur sind alle schmalen Streifen der früheren Figur geometrisch genau reproduziert, aber seitlich von ihnen reihen sich die nächsten schwarzen Striche nicht in größeren, sondern in kleineren Abständen an als in jener Figur. Infolgedessen erscheinen optisch die aus der früheren Figur kopierten Gebiete nicht mehr als feste lebhafte Streifen der „Gestalt" (im engeren Sinne), sondern mit der weiteren Umgebung zusammen als „bloßer Grund", und als festes Gestaltgitter treten Streifen auf, welche den noch kleineren Abständen entsprechen. Wie also ein lokaler Bereich seinen übergeometrischen Eigenschaften nach beschaffen ist, das hängt ganz offenbar von bestimmten geometrischen Daten der Reizkonfiguration ab (hier von den relativen Abständen der schwarzen Linien), aber eben in lokalen Bereichen von der Reiztopographie eines ausgedehnten Gebietes: den in diese Figur übernommenen Teilen der früheren Zeichnung gehören andere übergeometrische Eigenschaften zu, nachdem wir die Reizart in der Umgebung vertauscht haben.

Fig. 4.



175. Wir haben die Argumente betrachtet, welche für rein lokale, einzelne und gegenseitig unabhängige Empfindungsprozesse als Elemente und reine Teile optischer Felderregungen angeführt werden könnten. Die histologische Begründung war ohne jede Beweiskraft und selbst nur eine Behauptung. Diese wieder könnte veranlaßt werden durch die auffallende Ordnung der optischen Raumwahrnehmung und durch den Glauben, das optische Feld sei bis in kleinste Elemente lokalen Reizpunkten fest zugeordnet. In Wirklichkeit bedarf Ordnung in ausgedehntem physischen Geschehen nicht einer Bindung von lokalem Geschehen an unveränderlich vorgezeichnete und isolierte Wege, sondern ist auch in zusammenhängenden physischen Systemen möglich und realisiert, als Eigenordnung oder Struktur des Geschehens selbst. Die Lehre von der starren Punktzuordnung einer phänomenalen Geometrie zur Reizgeometrie verkennt die übergeometrischen Eigen-

schaften des Sehraumes und widerspricht einem schnell anwachsenden Erfahrungskomplex, nach welchem der örtliche Zustand in phänomenalen Feldern von der Reizkonfiguration weiter ausgedehnter Gebiete abhängt und also mit ihr variiert.

176. Damit ist unser Weg frei, der nur verschlossen wäre, wenn der optische Sektor des Nervensystems als eine große Anzahl gegeneinander abgetrennter physikalischer Systeme von kleinstem Querschnitt aufgefaßt werden müßte. Dieselben Überlegungen, durch welche man zur Ablehnung einer solchen Annahme gelangt, erleichtern das Verständnis der neuen Gedankenrichtung, und diese ist im Grunde durch den einen Satz zu charakterisieren:

Die physischen Gebiete, deren Erregungszustände physische Korrelate optisch-phänomenaler Felder darstellen, bilden ein in sich zusammenhängendes System.

Ein solcher Satz würde nicht viel besagen, wenn uns die Eigenschaften physischer Systeme unbekannt wären. Nachdem wir aber an physikalischen Beispielen gesehen haben, welcher sehr konkrete Sinn in diesen Worten liegt, sind wir von der Physik aus zu der Folgerung verpflichtet:

Psychophysisches Geschehen im optischen System hat die allgemeinen Eigenschaften von physischen Raumgestalten.

177. Wieder diese Behauptung bedeutet etwas mehr im einzelnen:

1. Zeitunabhängige Zustände bilden sich aus und dauern an für das System als ganzes. Das Geschehen in beschränkten Bereichen wird getragen von dem im übrigen System und umgekehrt; es entsteht und existiert so, wie es ist, nicht selbständig als ein Teil, sondern nur im ausgedehnten Gesamtverlauf als dessen Moment.

2. In jedem Falle eines aktuellen psychophysischen Geschehens ist dieses einem bestimmten Komplex von Bedingungen unterworfen. Zu diesem gehören

a) die gesamte retinale Reizkonfiguration des aktuellen Falles,
b) relativ konstante histologische und Materialeigenschaften des optisch-somatischen Systems,
c) relativ variable bedingende Faktoren, welche dem übrigen Nervensystem in erster und den Gefäßsystemen in zweiter Linie zuzuschreiben sind.

Wie in physikalischen Gestalten muß auch der jeweils auftretende psychophysische Zustand im Prinzip überall von den Bedingungen durchweg abhängig sein, seine örtlichen Momente müssen sich also der gesamten „Topographie“ gemäß ausbilden.

3. Werden konstante Bedingungen und zeitunabhängiger Zustand vorausgesetzt, so geht aus 1. hervor, daß die Gesamtheit des ausgedehnten Geschehens eine objektive (nicht etwa nur für einen Betrachter willkürlich zusammenfaßbare) Einheit darstellt. Denn in dem ganzen Gebiet ist kein örtliches Moment gegenüber dem Zustand in irgend einem anderen Bereiche vollkommen selbständig oder indifferent. Der räumliche Zusammenhang des psychophysischen Geschehens, welches einem gegebenen Gesichtsfeld entspricht, hat also übergeometrische, nämlich dynamisch-reale[1]) Konstitution.

4. Wie bei physikalischen Gestalten bedeutet physisch-reale Einheit des Gestalteten auch hier nicht unterschiedsloses Verschwimmen oder Unordnung, sondern ist mit strenger Gliederung wohl verträglich. Die Art der Gliederung hängt von der spezifischen Art des psychophysischen Geschehens und den jeweiligen Systembedingungen ab; aber in jedem Falle, für jeden aktuellen Bedingungskomplex ist die übergeometrisch-dynamische Geschehensgliederung genau so eine physisch-reale Eigenschaft des großen Bereichs, wie etwa die psychophysischen Farbreaktionen an einem Ort des Feldes.

5. Mit allen anorganisch-physikalischen Gestalten werden die psychophysischen folgende Abstufungen des inneren Zusammenhanges durch das System hin gemein haben: Die Momente in kleinsten Gebieten sind zwar im Prinzip von den Bedingungen des ganzen Systems abhängig, aber nach Maßgabe einer Entfernungsfunktion derart, daß sie von den bedingenden Formen eines zugehörigen Bereichs und seiner Nachbarschaft stärker bestimmt werden als von der Topographie entfernter Bereiche. Im Extremfalle ist (wie bei physikalischen Gestalten) die Einzelgliederung beschränkter Bereiche von den Formeinzelheiten in anderen Bereichen nicht mehr merklich abhängig; dann bestimmen sich nur mehr die „Gesamtmomente“ solcher Bereiche gegenseitig im ganzen und die Einzelgliederung der beschränkten Bereiche bildet sich gemäß den Systembedingungen innerhalb dieser Bereiche für sich aus (Unterschied des starken und schwachen Gestaltzusammenhanges). Der Raumgliederung oder Struktur nach können also solche beschränkte und unmittelbarer zusammenhängende Bereiche relativ selbständig sein — unbeschadet des Gestaltzusammenhanges im ganzen System, nach welchem sich dann noch die Gesamtmomente bestimmen —, und dadurch in einem sehr realen Sinne noch enger geschlossene Einheiten innerhalb des einheitlichen

[1]) Das Wort „dynamisch“ ist hier wiederum nicht als entgegengesetzt zu „statisch“ oder „stationär“, sondern zu „geometrisch“ gemeint.

Gesamtgeschehens darstellen. Ist kein Irrtum zu befürchten, wird nämlich die allgemeine Voraussetzung dabei nicht vergessen, daß das Geschehen im ganzen System Gestaltzusammenhang aufweist, so dürfen (wie früher auf anorganischem Gebiet) auch solche in sich enger geschlossene Einheiten kurz als Raumgestalten bezeichnet werden. Auf Gebilde dieser Art, welche „spezifische Ganze größeren Bereichs“ in dem noch größeren Bereich des aktuellen optisch-psychophysischen Gestaltgeschehens überhaupt sind, lassen sich die physiologischen Thesen Wertheimers unmittelbar beziehen, wenn für die betreffenden Gebiete noch eine bestimmte Energiebedingung erfüllt ist.

6. Wie immer die räumliche Gliederung psychophysischer Gestalten sonst beschaffen sein mag, so bedeutet sie doch jedenfalls auch die spezifische Ausbreitungsart einer Zustands- oder Geschehensintensität und damit räumlicher Energiedichte. Unter geeigneten Bedingungen kann die Energiedichte der einzelnen Systembereiche außerordentlich verschieden sein. Auch hierüber aber entscheiden die Systembedingungen im ganzen (vgl. unten 199 f.).

Energiedichte ist im Sinne der Physik zu verstehen und muß in physikalischen Dimensionen auf bekannte Art angebbar sein. Überhaupt ist keiner der Sätze in einem nur analogischen Sinn gemeint, und für jeden können Belege und Beispiele aus dem Gebiete anorganisch-physikalischer Gestalten beigebracht werden. Solches Zurückgehen auf reine Physik ist sogar dringend geboten, wo die Bedeutung des Gesagten bei Anwendung auf eine andere Art von System unsicher werden sollte.

178. Diesen Eigenschaften des optisch-somatischen entsprechen die folgenden des phänomenalen Feldes, und da jene aus physikalischen Gründen anzunehmen sind, sobald man den optischen Sektor als ein physikalisches System erkannt hat, so rührt die Übereinstimmung nicht daher, daß wir die Zustände des somatischen Feldes denen des phänomenalen gemäß konstruiert hätten.

I. Phänomenale optische Felder erscheinen als in sich zusammenhängende Einheiten und haben stets übergeometrische Eigenschaften. Phänomenale Einzelbereiche treten nie vollkommen indifferent als selbständige „Teile“ auf; so entsprechen sie Momenten der physischen Gestalt.

II. Die phänomenale Einheit ist mit Ordnung und Struktur verträglich, und die spezifische Gliederung des phänomenalen Feldes (Korrelat der physischen Zustandsstruktur) stellt eine übersummative Eigenschaft des Gesichtsfeldes dar, welcher die gleiche Erlebnisrealität zukommt, wie z. B. den farbigen Erfüllungen des Feldes.

III. Unbeschadet der Feldeinheit im ganzen und in ihr erscheinen besonders fest in sich geschlossene phänomenale Einheiten beschränkter Bereiche relativ selbständig gegenüber dem übrigen Felde.

IV. Insbesondere pflegen sich lebhafte, feste Bereiche, „Gestalten“ im engeren Sinne, von dem übrigen optischen Feld als „bloßem Grund“ deutlich abzusetzen, falls der gegebene Reizkomplex gewissen Bedingungen genügt.

Man zieht sofort den Schluß, daß die Lebhaftigkeit und Eindringlichkeit, durch welche bestimmte beschränkte Bereiche sich spontan als „Gestalten“ (im engeren Sinne) hervorheben, so daß sie phänomenologisch ganz anders „da sind“ als der „bloße Grund“, in hoch gesteigerter Geschehensintensität oder Energiedichte des psychophysischen Gestaltkorrelats ihre Parallele findet. Auf solche Art entspricht den physisch-übergeometrischen Eigenschaften des in sich zusammenhängenden ausgedehnten Zustandes durchweg die phänomenal-übergeometrische Konstitution des optischen Feldes. Wir haben noch einen auffallenden Charakter des gesehenen optischen Feldes kennen gelernt, welcher ebenfalls übergeometrisch, aber mehr funktioneller als unmittelbar phänomenaler Natur ist: Wie begrenzte Bereiche des Gesichtsfeldes gesehen werden, bestimmt sich nach den Reizbedingungen in ausgedehnteren Gebieten; das gilt von der Raumgliederung überhaupt wie von der jeweiligen Lokalisierung des lebhaften „Gestalt“-Gebietes (im engeren Sinne). Aber daß die Struktur der räumlichen Ausbreitung und die Lokalisierung der Gestaltenergie sich nach den Systembedingungen größerer Bereiche ausbilden, ist eine allgemeine Eigenschaft physischer Raumgestalten (vgl. oben 177).

179. Hiernach, wie ja schon auf Grund unserer physikalischen Voruntersuchung, müssen wir uns sagen, daß der Gegensatz von physischer Welt und Bewußtsein, besonders aber der von nervösem Geschehen und Phänomenen, gewöhnlich etwas übertrieben dargestellt wird; denn unter den nahen Entsprechungen „beider Welten“, auf die wir jetzt aufmerksam werden, sind solche, welche wir entweder schon für die Optik ablehnen müßten oder aber auch sonst anzuerkennen hätten. Das Auftreten komplexer Einheiten, welche doch zugleich von jedesmal spezifischer Gliederung sind, wird z. B. mit Recht als charakteristisch selbst für höchste psychische Leistungen angesehen; wenn diese Erscheinung auf optischem Gebiete ihr Korrelat in physischem Strukturzusammenhang findet, wird im Bereiche der Denkvorgänge dasselbe gelten müssen[1]).

[1]) Es war stets einer der Haupteinwände gegen die Annahme physischer Korrelate des Denkens (der höheren psychischen Vorgänge überhaupt), daß „Einheiten von spezifischer Gliederung“ nicht als physische Realitäten vorkämen, ja nicht vorkommen könnten. Da dieser Einwand bei Anerkennung der dynamisch-übergeometrischen Strukturen oder Gestalten überall fortfällt, so erkennt man wohl jetzt schon, was die Gestalttheorie zukünftig für die höhere und besonders die Psychologie des Denkens wird bedeuten müssen.

180. Beschränken wir uns aber wie bisher auf das optische Gebiet, so stehen wir da zwar ganz am Anfang der Untersuchung, aber wir brauchen nicht zu verschweigen, was ja doch schon klar sein dürfte: Läßt sich die Theorie wirklich durchführen, dann muß sie auf eine Art sachlicher Ähnlichkeit zwischen psychophysischem Geschehen und phänomenalem Feld in ihren Gestalteigenschaften hinführen, nicht nur im allgemeinen, insofern es sich eben beiderseits um Gestalten handelt, sondern in dem Spezifischen jeder Gestalt in jedem einzelnen Falle. Nach einer verbreiteten Ansicht sollen psychophysisches Geschehen und zugehörige phänomenale Gegebenheiten „in ihren Elementen sowohl wie in der Art der Verbindungen der Elemente unvergleichbar sein“ (Wundt). Eine durchaus entgegengesetzte Anschauung (welche wohl auf Johannes Müller zurückgeht) besagt dagegen zweitens, daß Bewußtsein die phänomenale Abbildung wesentlicher Eigenschaften psychophysischen Geschehens gibt. Dieser Gedanke konnte bisher im einzelnen nur angewendet werden auf die Theorie der Ordnungseigenschaften von Farben in dem Sinne, daß den gegenständlichen Beziehungen im Farbensystem gegenständliche Beziehungen in dem System möglicher Farbprozesse genau entsprechen sollen. Wir meinen noch etwas Anderes und Radikaleres: Aktuelles Bewußtsein ist in jedem Falle zugehörigem psychophysischen Geschehen den (phänomenal und physisch) realen Struktureigenschaften nach verwandt, nicht sachlich sinnlos nur zwangläufig daran gebunden[1]).

Oft hat man gefragt: Wie sollen die Umlagerungen oder Schwingungen usw. der Moleküle im Gehirn sachlich irgendwie dem phänomenalen Gehalt unserer Erlebnisse entsprechen? Die Frage ist wörtlich in einem gewissen Sinne sehr zutreffend. Aber wer heißt uns auch, an das psychophysische Problem gerade mit solchen Vorstellungen aus der Physik herangehen, die mit den bedeutendsten Eigenschaften von Bewußtsein sicherlich am wenigsten zu tun haben? Untersucht man, auf diese Idee von der „blind-

[1]) Man pflegt zu sagen, selbst bei genauester physikalischer Beobachtung und Kenntnis der Hirnprozesse würde doch aus ihnen nichts über die entsprechenden Erlebnisse zu entnehmen sein. Dem muß ich also widersprechen: Es ist im Prinzip eine Hirnbeobachtung denkbar, welche in Gestalt- und deshalb in wesentlichsten Eigenschaften Ähnliches physikalisch erkennen würde, wie der Untersuchte phänomenal erlebt. Praktisch erscheint dergleichen fast undenkbar, nicht allein aus technischen Gründen im gewöhnlichen Sinne — wir sahen (von allem übrigen abgesehen), daß bereits einfache physikalische Strukturen kaum experimentell zu ermitteln sind —, sondern vor allem wegen einer erst im 4. Kapitel zu besprechenden Schwierigkeit (Unterschied des anatomisch-geometrischen und des funktionellen Gehirnraumes).

mechanischen Bewegung kleinster Teilchen" festgelegt, irgendwelche Strömungsgestalten auch nur im Anorganischen, so wird man allenfalls über die Materialnatur der Strömung etwas erfahren und darüber, daß der betreffende Vorgang oder Zustand im Kleinsten von ungeordneter Wärmebewegung fast verdeckt wird, aber die Gesetze des ausgedehnten Geschehens im Ganzen wird man auch in der Physik des Anorganischen so schwerlich verstehen (vgl. oben 165). Es steckt wieder die petitio principii in jener Frage, daß die Zustandsmöglichkeiten der physischen Welt auf „Umlagerungen oder Schwingungen von kleinsten Teilen" beschränkt seien, daß die Grundannahmen der kinetischen Gastheorie die der ganzen Physik bedeuteten, und kein physisches System nach Zuständen und Vorgängen im Großen eine geordnete Realeinheit bilde.

181. „Denn was innen, das ist außen." Wir sahen, daß phänomenale Gestalten nächste Verwandte in bestimmten anorganisch-physikalischen Gebilden haben, und finden jetzt, daß gestaltete Geschehens- oder Zustandsarten im optischen Sektor des Nervensystems, an denen wir die Eigenschaften jener anorganischen Vorbilder voraussetzen, in wesentlichen Zügen mit der Konstitution des zugehörigen optisch-phänomenalen oder Gesichtsfeldes übereinstimmen dürften. Dagegen kann man in einem bestimmten Sinne nicht sagen, was innen, das sei außen: Wir haben die übergeometrischen Eigenschaften der psychophysischen und phänomenalen Gestalten der „objektiven Geometrie der Reize" gegenübergestellt, welche in vieler Hinsicht den wichtigsten Bedingungskomplex der optischen Gestalten bedeutet. Diese objektiven Bedingungen selbst und als solche sind im allgemeinen sicherlich keine physischen Gestalten, sondern summativ geometrische Mannigfaltigkeiten, wennschon von Physischem [1]). Das gilt z. B. von den vielen reflektierenden Flächenelementen der oben betrachteten Zeichnungen, welche alle das auffallende Tages- oder Lampenlicht eben als Elemente zurückwerfen, ohne daß diese dabei voneinander in irgend einer hier zu berücksichtigenden Weise abhängig wären. Da spricht man mit Recht von einer reinen Geometrie der Reizkonfiguration. Selbst wenn aber ein physisches Gebilde, welches durch sein Reflektieren des Lichtes Bedingung für ein gestaltetes psychophysisches Geschehen und eine gestaltete Raumwahrnehmung wird, an und für sich wirklich physische Gestalteigenschaften besitzt, wie das bei einer gespannten Membran der Fall ist, so kann doch auch hier die Lichtreflexion an jedem Oberflächenelement als unabhängig von der an den Nachbarn gelten, und als Reizkomplex beurteilt, ist die reflektierende Fläche immer

[1]) Diese Frage hat zuerst Koffka sachgemäß behandelt (a. a. O., S. 33 ff.).

noch „reine Geometrie“, der elastische Gestaltzusammenhang in ihr wirkt nicht irgendwie als Reiz auf unser Nervensystem ein, sondern bleibt unserer (freilich ebenfalls gestalteten) Wahrnehmung fremd. Gesehene Gestalten gehen also nicht auf eine Abbildung von physischen Gestalten der Umgebung als solchen zurück. — Dies zur Vermeidung von Mißverständnissen. Inwiefern trotzdem psychophysische und phänomenale Gestalten einen sehr hohen Objektivitätswert besitzen können, ist hier noch nicht zu untersuchen.

Zweites Kapitel.

Zur Physik der optischen Gestalten.

182. Der Sinn weiterer allgemeiner Überlegungen würde leicht etwas unsicher werden, wenn wir unsere Vorstellungen von dem gestalteten Geschehen nicht konkreter und anschaulicher machen könnten. Die ersten Aufgaben einer Physik der zeitunabhängigen psychophysischen Gestalten lassen sich in folgende drei Fragen zusammenfassen:

1. Welche der möglichen Unterformen von Zeitunabhängigkeit ist in dauernden Gestalten des optischen Gebietes realisiert?

2. Über welchen Bereich des Nervensystems erstrecken sich gestaltmäßig zusammenhängende optische Zustände?

3. Welches ist das Gestaltmaterial und die Art der wirksamen Naturkräfte?

Die drei Fragen haben so nahe Beziehungen zueinander, daß sich eine von ihnen schwer allein beantworten läßt.

183. Für das erste Problem kommen im ganzen folgende Lösungen in Betracht: Zeitunabhängige Gestalten könnten Ruhezustände oder stationäre Vorgänge sein; in einem bestimmten Sinne müssen aber auch periodisch-stationäre Verläufe als zeitlich konstant angesehen werden. Von diesen war in der physikalischen Voruntersuchung noch nicht die Rede, und zwar damit diese Vorbereitung sich nicht allzu breit ausdehne. Wir wollen hier — unter Vorbehalt späterer Betrachtung im einzelnen — zwei Eigenschaften periodisch-stationären Geschehens kurz als gegeben voraussetzen:

a) In einem zusammenhängenden System bildet sich die räumliche Ausbreitungsart stationär-oszillierender Verläufe nach den physischen Bedingungen (der „Topographie“) im Ganzen aus, und deshalb findet das Begriffspaar „Struktur-Momente“ auf diese Ausbreitungsart Anwendung; dieses Prinzip unterliegt nur denselben

Einschränkungen wie in den betrachteten Fällen von Ruhe und von stationären Zuständen. Der räumlichen Ausbreitungsart nach hat ein solches Geschehen also Gestalteigenschaften. [Als Beispiel kann das Oszillieren von Gasen in Hohlräumen (bedingenden Formen) dienen, ferner etwa stationäres Oszillieren von elektrischen Strömen in verzweigten Leitersystemen. Nach den Untersuchungen der früheren Abschnitte gibt schon ein Blick auf die theoretisch-mathematische Behandlung solcher Geschehensarten die Erkenntnis, daß ihre räumliche Ausbreitung innerhalb gegebener Formen nichtsummativer Natur ist.]

b) Es liegt im Begriff des periodisch-stationären Zustandes, daß (nach Ablauf eines dynamischen Entstehungsvorganges) die Bedingungen und das Geschehen selbst dieses ständig und überall auf frühere Phasen zurückführen, so daß das System von der Zeit im Großen unabhängig ist. Wenn es also eine Minimalzeit (Periode) gibt, unterhalb welcher Oszillationen keine unmittelbar psychophysische Bedeutung (als zeitliche Variationen) im optischen Sektor des Nervensystems haben, und wenn das gestaltete Geschehen in einer Periode unterhalb dieser Grenze oszillierte, so wäre es durchaus denkbar, daß entsprechende Phänomene „phänomenal ruhend" erschienen. Man tut gut, auch diese Möglichkeit von vornherein zu beachten. Hier ist vorläufig nur wesentlich, daß ein stationäres Oszillieren der psychophysischen Prozesse im optischen Sektor ihren Charakter als Raumgestalten durchaus nicht aufheben würde, wofern es sich nur um ein zusammenhängendes System handelt. — Stationäres Geschehen kann mit periodisch-stationären Zuständen kombiniert vorkommen, indem sich Wellen über eine stationäre Verschiebung lagern.

184. Von vornherein ist es wenig wahrscheinlich, daß die psychophysischen Gestalten Ruhezustände sind, physiologische und psychologische Gründe weisen auf irgend eine Art von Geschehen als Korrelat der zeitunabhängigen optischen Gestalten hin. Wir haben also zwischen stationären und periodisch-stationären Vorgängen sowie endlich aus beiden Geschehensarten kombinierten Zuständen zu wählen. — Nervenphysiologische Versuche, welche für den optischen Sektor zwischen diesen Möglichkeiten zu entscheiden erlaubten, wurden bisher meines Wissens nicht angestellt, wären aber ohne prinzipielle Schwierigkeiten auszuführen. Die Untersuchung des Auges in elektromotorischer Hinsicht gibt uns, wie wir im folgenden noch erkennen, keine sichere Aufklärung über dies Problem.

185. Die zweite Frage kann dazu führen, den psychophysischen Gestalten eine noch größere Bedeutung für den optischen Sektor zuzuschreiben, als bisher angenommen wurde. Als somatisches

Gebiet, auf das sich unsere Überlegungen beziehen, stellt man sich zunächst die Sehrinde, allenfalls mit Einschluß subkortikaler optischer Gebiete vor. Indessen stellen die optischen Sinnesflächen im Grunde keine „peripheren Sinnesorgane“ dar, sondern Hirnteile, welche freilich speziell ausgebildet und sogar durch Muskeln beweglich geworden sind, die sogenannten „Sehnerven“ ferner müssen eher als gewaltige Hirnkommissuren gelten, und schon deshalb besteht kein Anlaß, den peripher liegenden Gebieten des optischen Systems eine Funktionsart abzusprechen, die man zentraleren Feldern beimißt. Noch wesentlicher ist, daß gestaltetes Geschehen gar nicht auf somatische Gebiete beschränkt zu sein braucht, welchen wir eine besondere Leistungsfähigkeit zuschreiben wie Großhirnfeldern; denn selbst anorganische Systeme ohne alle besonderen Vorrichtungen können ja dergleichen aufweisen. Wir wissen endlich, daß die Retina in Funktion elektromotorische Kräfte entwickelt, und da wir deren Gestalteigenschaften schon erkannt haben, so gibt es wirklich gestaltetes Geschehen in dem, was wir peripheres Auge nennen (vgl. Abschnitt I).

Damit entfällt eine erste denkbare Antwort, welche den Bereich optisch-somatischer Gestalten eng abgrenzen und besagen würde, daß das Gestaltprinzip nur auf zentralere Felder anzuwenden sei. Jetzt bleiben noch zwei verschiedene Ansichten möglich:

I. Im retinalen Gebiet verlaufendes Geschehen von Gestalteigenschaften bleibt auf dieses Niveau beschränkt. Irgendwie beschaffene „Leitung“, welche also nicht zu diesem Geschehen gehört, setzt dem Zustand der Retina gemäß in den einzelnen Zellen höherliegender Felder bestimmte feste Bedingungen, und diesen (als der wesentlichen „Topographie“ oder „physischen Form“) gemäß bildet sich ein zweiter, und zwar der psychophysisch maßgebende gestaltete Zustand in jenen zentraleren Feldern aus. Über den Charakter der Leitung wären sehr verschiedene Unterhypothesen möglich; doch wird ebenso ausgeschlossen, daß die Leitung in den zentralen, wie daß sie in den retinalen Gestaltzusammenhang einbezogen ist; denn jenem soll sie ja die Bedingungen angeben, welche selbst als unabhängig von der Struktur zu gelten haben.

II. Der jeweilige Komplex von Retinaerregungen gibt den Anlaß und zugleich die spezifischen Bedingungen für ein gestaltetes Geschehen, welches den optischen Sektor von der Sinnesfläche an (und diese einbezogen) durchweg erfüllt. Was gewöhnlich „Reizleitung“ zwischen der Sinnesfläche und Großhirnfeldern genannt wird, ist das gestaltete Geschehen auf diesem Wege, und eben das gleiche Geschehen (samt seinen Folgeerscheinungen) wird in psychophysisch maßgebendem Niveau das Korrelat gesehener Raumgestalten.

186. Die Annahme II erscheint unzweifelhaft als sehr radikal, wenn man sie mit den bestehenden Anschauungen über den Zusammenhang von Sinnesfläche und Großhirnfeldern vergleicht. Die retinale Abbildung und der ihr entsprechende Komplex von Farberregungen auf der Netzhaut, das sind die Voraussetzungen, welche die Annahme II beibehält, aber von da an und noch in der Sinnesfläche soll das maßgebende Geschehen nach ganz anderen, nämlich physikalischen, anstatt geometrisch-mechanistischen Prinzipien gedacht werden, und die Retina soll zu dem einen physikalischen System gehören, in dessen Gesamtbereich der optische Gestaltprozeß verläuft. Da wir jedoch von physikalischen Gesichtspunkten her zu urteilen haben, welche bei der Ausbildung der gegenwärtigen mechanistischen Theorie ohne jeden Einfluß geblieben sind, so muß die Entscheidung unabhängig von gewohnten Vorstellungen allein nach sachlichen Gründen getroffen werden.

187. Zu welchen Folgerungen führt die Annahme I? Wenn der Leitungsprozeß nicht durch die Retina hindurch, ebensowenig aber durch höhere Felder gestaltmäßig zusammenhängt, und wenn wir über ihn nicht sehr künstliche Voraussetzungen machen wollen, so kommen wir auf die alte Hypothese zurück, daß Leitung eine Angelegenheit jeder Elementarbahn für sich sei. Wenn ferner die Leitung in jeder Elementarbahn für sich eine „physische Bedingung“ für ihre zentrale Endigung setzt, und wenn gemäß dem Komplex dieser Bedingungen (als bestimmender Topographie) ein gestaltetes Geschehen im zusammenhängenden zentralen Feld entsteht, so lassen sich wieder über diese Bedingungen zwei verschiedene Hypothesen aufstellen:

a) Diese Bedingungen gehören zwar nicht selbst zur zentralen Gestalt, sondern bilden die summativ gruppierte und unveränderliche Topographie für das gestaltete Geschehen; aber sie sind selbst lokale psychophysische Zustände in dem Sinn, daß ihnen Bewußtsein entspricht. Die Leitung wird dem zentralen Feld lokale Bedingungen vermitteln, welche von dem Zustand des retinalen Ausgangspunktes abhängen, und wenn also diese lokalen (gegenseitig unabhängigen) Bedingungen von Bewußtsein begleitet sind, so sieht man, daß derartige Bewußtseinsinhalte sehr genau mit dem übereinstimmen würden, was man zurzeit „Empfindungen“ nennt (vgl. oben 160 ff.). Daraus ergibt sich weiter, daß diese Annahme Ia, konsequent ausgebildet, eine Art „physiologischer Produktionstheorie“ werden könnte, insofern von dem gestalteten Geschehen unabhängige Empfindungen die phänomenalen Korrelate einer rein summativen physischen Topographie darstellen und nun erst dieser Topographie gemäß noch zweitens der Gestaltprozeß (und das Gestaltbewußtsein) hinzukommt. Man braucht diese Hypothese nur

mit der phänomenologischen Erfahrung zu vergleichen, um zu sehen, daß sie abzulehnen ist. Es gibt ein derartiges Doppelbewußtsein nicht, in welchem sich eine rein summative Empfindungsmannigfaltigkeit, außerdem ein Gestaltbewußtsein neben- oder übereinander fänden, und zwar fehlt jene Mannigfaltigkeit an selbständigen Empfindungen, damit fehlen auch die Gegensätze und Widersprüche zwischen den Empfindungen und dem Gestaltbewußtsein, welche nach der Produktionshypothese fortwährend in den Raumwahrnehmungen beobachtet werden müßten: denn die Empfindungen wären lokal fest bestimmt, der Gestaltprozeß dagegen von Empfindungen oder ihren physischen Korrelaten in größerem Bereich. Dieselben Gründe, die gegen eine psychologisch-intellektualistische Produktionstheorie anzuführen sind, bleiben gegenüber dieser physiologischen Gedankenbildung entscheidend [1]).

b) Die zentralen Bedingungen, welche die Leitung schafft, gehören wiederum nicht selbst zum zentralen Gestaltprozeß, sondern bilden dessen im Prinzip unveränderliche bestimmende Topographie; aber sie stellen auch keine psychophysischen Prozesse oder Zustände dar, es entspricht ihnen kein Bewußtsein. Sobald lokale Leitung überall im zentralen Feld die Bedingungen festlegt, entsteht ein zentraler gestalteter Prozeß, welcher das physische Korrelat der Wahrnehmung durchweg ist; es gibt keine selbständigen, wie Teile einer Summe auftretenden Empfindungen, lokale psychophysische Zustände bilden sich nur im ganzen Prozeß aus, alle Bereiche des phänomenalen Feldes sind, wie sie erscheinen, nur in der Struktur vorhanden.

188. Zwischen den Annahmen I b und II besteht in dem wichtigsten Punkt, der unmittelbaren Entsprechung von gestaltetem Geschehen und Bewußtsein kein Unterschied. Die Wahrnehmungspsychologie wird hier und dort auf die gleiche (von Wertheimer angegebene) Weise und, wie Koffka scharf hervorgehoben hat, in entscheidendem Gegensatz zu der Empfindungshypothese begründet. Ob man I b oder II wählt, wird davon abhängen, welche Ansicht am Ende besser zu den Einzeltatsachen physiologischer und psychologischer Beobachtung paßt. Ich richte mich im folgenden nach der Annahme II, obwohl sie auf den ersten Blick so radikal erscheint. Ein Anlaß hierfür ist, daß wir zu der Anerkennung von gestaltetem Geschehen in der Retina durch die physiologische Erfahrung doch schon gezwungen sind; zwischen ungleichartig erregten Netzhautgebieten bestehen unzweifelhaft elektromotorische Kräfte. Danach wird es für den physikalischen Standpunkt schwer,

[1]) Vgl. die Koffkasche Kritik a. a. O.

die sogenannte Leitung in Nervenbahnen aus jenen Gebieten aufwärts von diesem Gestaltfaktor unabhängig zu denken, oder deutlicher: Die Leitung in den Nervenbahnen *eines* Gebietes bildet sich nicht für sich allein, sondern — wegen des Zusammenhanges in der Retina — in Abhängigkeit von der Leitung in den *übrigen* Gebieten (Bahnen) aus und umgekehrt; also besteht ein Gestaltzusammenhang durch die Retina hindurch in den aufsteigenden Bahnen und somit bis in zentrale Felder. Wird auf diese Weise die Nervenleitung ein gestaltmäßig bestimmtes Geschehen, so ergibt sich als einfachste Folgerung, daß das *gleiche* Geschehen (und seine Folgeerscheinungen) in den psychophysisch maßgebenden Niveaus das Korrelat des phänomenalen Feldes darstellt, und das ist eben die Annahme II. Weitere Gründe, welche für diese sprechen, fand ich darin, daß die Anwendung des Gestaltprinzips auf die Theorie von konkreten Einzelproblemen unter Voraussetzung von II einfacher ausfällt als bei anderen Grundgedanken.

Sollte trotzdem die Annahme II irrig sein, so ist daran festzuhalten, daß mit ihr als einer speziellen Art, das Gestaltprinzip anzuwenden, nicht dieses selbst (in seiner Anwendung auf das optische System überhaupt) hinfällig würde; denn dann müßte man eben auf die Annahme Ib zurückkommen. Diese hat ursprünglich *Wertheimer* gemacht[1]). — Die weiterhin zunächst mitzuteilenden Überlegungen könnten leicht auch in eine Form gebracht werden, die der Hypothese Ib entspräche; die, wie ich meine, bedeutenden Vorzüge von II dürften sich jedoch bei weiterer Durchführung der Theorie noch deutlich zeigen.

189. Die Annahme II gibt also als vorläufiges Gesamtbild: *Der Bereich, in welchem optisches Gestaltgeschehen verläuft, ist mindestens der ganze optische Sektor.* Ein sehr großer Teil der Bedingungen (Topographie) in diesem System ist als nahe konstant und, wie wir später sehen, als sehr einfach beschaffen vorauszusetzen. Trotzdem sind unübersehbare Mannigfaltigkeiten des Geschehens möglich, weil ein Teil des Bereiches, die Netzhaut, den Einwirkungen äußerer Strahlung in streng gesetzmäßiger Weise unterliegt (Abbildung) und dadurch in einen ausgedehnten Komplex je nach der lokalen Lichtart nebeneinander verschieden reagierender Substanzgebiete verwandelt wird. Wir setzen die unmittelbar *photochemische* Wirkung an einer Netzhautstelle als unabhängig voraus von der an anderen Stellen; dann werden die retinalen Gebiete durch das einfallende Licht (der Abbildung) einigermaßen im stationären Zustand ihrer Reaktionen erhalten und geben durch ihre Gruppierung die entscheidende Topographie für das gestaltete Geschehen ab. Von dieser Topo-

[1]) In der Entscheidung für Annahme II besteht die früher (156, Anm. 1) erwähnte Abweichung von den ursprünglichen Gedanken *Wertheimers*.

graphie nehmen wir vorläufig an, daß sie von dem Gestaltprozeß nicht sozusagen rückwärts beeinflußt werden kann[1]); die lokale Reaktionsart der Retina soll also nur von dem lokal einfallenden Licht abhängen[2]). Im Prinzip nach der Gesamtheit dieser Konfiguration retinaler chemischer Zustände (sowie nach der übrigen relativ konstanten „inneren" Systemtopographie) bildet sich von der Retina an der Gestaltprozeß aus.

190. Ich habe die retinale Topographie entscheidend genannt, weil in erster Linie sie (gemäß der jeweiligen Abbildung) die unübersehbare Mannigfaltigkeit möglicher und wechselnder Systemzustände bestimmt. Es versteht sich von selbst, daß sonstige Bedingungsänderungen, wo sie (wie in zentralen Feldern) ebenfalls recht leicht entstehen, im Einzelfall dieselbe Beachtung verdienen wie irgend ein retinaler Umstand; doch sind die Modifikationen, welche auf jene Art erzeugt werden, im allgemeinen gewiß nicht so bedeutend und so mannigfaltig wie die unzähligen möglichen Gestaltänderungen bei wechselnder Retinatopographie und konstanten zentralen Bedingungen[3]).

191. Haben wir irgend eine Sicherheit, daß für jeden Fall mit dem optischen Sektor der ganze Bereich des einen zusammenhängenden Geschehens angegeben ist? Allein die Erfahrung kann wieder zeigen, ob die Funktionen noch anderer nervöser Gebiete den Eindruck erwecken, mit dem sensorisch-optischen Ge-

---

[1]) Ich sage „vorläufig", da eine Beeinflussung der bedingenden Topographie durch das gestaltete Geschehen wie in physikalischen Fällen auch in der Retina wohl möglich ist. Für eine erste Betrachtung aber werden wir dergleichen vernachlässigen dürfen, um so wichtigere Gesichtspunkte zunächst deutlich zu machen.

[2]) Dabei ist als selbstverständlich nicht erwähnt, daß der lokale Materialzustand der Retina (unmittelbar vor Belichtung) den lokalen Reizerfolg mitbedingt.

[3]) Es ist gar nicht meine Absicht, den Einfluß aktiver Verhaltensweisen und Verhaltensänderungen des Sehenden auf die gesehenen Gestalten zu leugnen oder auch nur als unbedeutend hinzustellen. Aber gegenüber der älteren Gestalttheorie, besser der Produktionshypothese muß doch zunächst prinzipiell behauptet werden: Eine besondere Aktivität des Sehenden ist zum Entstehen von Gestalten nicht erforderlich. Der Anlaß, einen intellektuellen Vorgang als conditio sine qua non der gestalteten Wahrnehmung vorauszusetzen, fällt nach dem Ergebnis der physikalischen Voruntersuchung fort; denn es ist nicht evident, sondern falsch, daß die beobachteten Eigenschaften von Gestalten im Physischen und im rein Sensorischen nicht vorkommen könnten. — Daß die häufigen und mitunter sehr beträchtlichen Umbildungen von Gestalten durch aktive Verhaltensrichtungen des Sehenden hier nicht behandelt werden, hat seinen Grund einfach darin, daß es damit dem Verfasser wie wahrscheinlich dem Leser fürs erste Mal zu viel werden würde; und bei dem eben formulierten prinzipiellen Standpunkt ist diese Beschränkung der Aufgabe ja auch vollkommen zulässig.

schehen in Gestaltzusammenhang zu stehen, und die Erfahrung scheint z. B. auf sehr unmittelbare Abhängigkeit der Augenbewegungen von dem jeweiligen optischen Gestaltvorgang hinzuweisen. Es wäre also möglich, daß die Zustände (Verläufe) im dritten, vierten und sechsten Hirnnerv mit denen des sensorisch-optischen Sektors in Gestaltverband sind [1]).

192. Übrigens führt schon jetzt die Annahme II zu der etwas überraschenden Folgerung, daß einem bestimmten gestalteten Geschehen in gewissen seiner Bereiche Bewußtsein entsprechen kann, während die Fortsetzung desselben Geschehens oder sein Beginn — beide Worte sind nicht ganz treffend — vermutlich keine unmittelbare psychophysische Bedeutung haben. Denn wenn z. B. die retinalen Prozesse nicht selbst von Bewußtsein begleitet, wohl aber in den allgemeinen Gestaltzusammenhang des optischen Sektors einbezogen sind (Annahme II), dann decken sich die Bereiche des physischen Gestaltgeschehens und des eigentlich psychophysischen Korrelates nicht ganz; jenes Gebiet ist ausgedehnter. Derartiges könnte auch sonst im Konnex hirnphysiologischer Zustände vorkommen, und es ist eine Frage von Bedeutung, ob ein solcher Umstand sich in jenem Bewußtsein, als dem Korrelat eines unvollständigen und von Momenten außerhalb des psychophysischen Bereichs getragenen Gestaltvorganges, nicht irgendwie merklich macht. Kann einem Bewußtseinszustand ein Hinweis über ihn selbst (und über Bewußtsein überhaupt) hinaus immanent sein, so wie sein physisches Korrelat als unvollständige Gestalt den dynamischen Hinweis über sich selbst hinaus enthält?

193. Die dritte Frage lautet: Welcher Natur ist dasjenige, was im optischen Sektor nach dem Typus „Struktur-Momente“ verbreitet auftritt?

Wenn man sich hinsichtlich des Gestaltbereiches für die Annahme II entschieden hat, also die sogenannte Leitung in Sehbahnen als das gestaltete Geschehen zwischen Retina und zentralen Feldern auffaßt, ist bereits deutlich, daß es sich um eine Strömung handelt, die (bei ungefähr konstanten Bedingungen) entweder stationär oder stationär-oszillierend oder endlich eine Kombination dieser beiden Strömungsformen sein kann. Die Struktur der Strömung ist dann ähnlich wie die von in der Physik vorkommenden Stromarten zu charakterisieren, durch die Verlaufsart von Stromfäden, Gruppierung der Stromdichte und der entsprechenden Energie; wenn das gelingt, am einfachsten durch eine Potential-

[1]) Schließlich bleibt zu bedenken, was oben 134 Anm. über aktuelles „Gesamtbewußtsein“ überhaupt gesagt wurde.

funktion. Da das Nervensystem Elektrolyt ist, wird jede, auch eine elektrische Strömung, in ihm von Substanztransport begleitet; verschiebt die Strömung in verschiedenen ihrer Gebiete oder Stromfäden verschiedene Substanzen, so gehört zur Charakterisierung des Geschehens noch die Angabe, welche Substanzarten in welchen Bereichen verschoben werden. Ob damit die Beschreibung der Struktur vollständig wäre, hängt von den leitenden Eigenschaften der Strombahn und der Natur der wirksamen Naturkräfte ab.

194. Von diesen Kräften war bereits im ersten Abschnitt die Rede. Jede geeignete Beobachtung des erregten oder leitenden Nervensystems zeigt, daß an dem nervösen Geschehen elektrische Kräfte teilnehmen, und sowie man das physikalische Gestaltprinzip auf konkrete Fälle der Gestaltwahrnehmung anzuwenden sucht, stößt man immer wieder auf Phänomene, welche durch ihren Habitus auf elektrische Grundlagen hinweisen. Wo die chemische Konstitution der retinalen Reaktionsgebiete (d. i. die wesentliche Topographie) sich sprungartig ändert, treten elektromotorische Kräfte auf. Die elektromotorischen Kräfte allein, d. h. die Unstetigkeiten des elektrostatischen Potentials an solchen Grenzkurven (Konturen), konnten jedoch nicht zum Verständnis von Raumstrukturen in psychophysischem Geschehen führen; denn sie waren nicht von Formen oder Größen, sondern nur einfach von den Materialunterschieden zu beiden Seiten der Grenze abhängig, in der optischen Sinnesfläche also von den Farbreaktionen beiderseits (Abschnitt I, 14). Das Auftreten von elektromotorischen Kräften an Materialgrenzen führt aber stets (wenigstens im ersten Augenblick) zu Verschiebungen durch das ganze System, und das sind Ströme. Wir haben inzwischen gesehen, daß Strömungen, welche von elektromotorischen Kräften unterhalten werden, oder an denen diese Anteil haben, sich unmittelbar Formen und Größen gemäß ausbilden.

195. Es liegt nun nahe, bei diesem Sachverhalt die Frage nach der Natur gestalteten Geschehens im optischen Sektor sehr einfach zu beantworten und stationäre (quasistationäre) elektrische Ströme im leitenden Elektrolyten für die gesuchte Geschehensart zu halten. Da in diesem Falle das sehr reiche Wissen der Physik von solchen Strömen nur auf das Nervensystem angewendet zu werden brauchte, so würden allenfalls praktische Schwierigkeiten in Einzelanwendungen, aber wohl nirgends prinzipielle Unklarheiten übrig bleiben. Wirklich sind ja bei geeignetem Zusammenwirken von mehreren elektromotorischen Kräften Strömungen in somatischen Feldern möglich, welche ganz dieselben Eigenschaften haben wie irgendwelche elektrolytisch geleiteten Ströme in der Physik des Anorganischen. Im Auge z. B., auf welches es uns hier vor

allem ankommt, genügen die eigenen elektromotorischen Kräfte bei Funktion, obwohl sie mit denen unserer galvanischen Elemente an Betrag gar nicht zu vergleichen sind, doch zur Unterhaltung meßbarer quasistationärer Ströme, und zwar durch Widerstände von der Größenordnung 100000 Ohm hindurch; das beweist ja jede Untersuchung mit einem etwas empfindlichen Galvanometer. Danach ist es sehr wohl denkbar, daß gewöhnliche stationäre Ströme zu dem gestalteten Zusammenhang von optischer Leitung und psychophysischem Geschehen gehören. Aber zweierlei zwingt uns zu großer Vorsicht in der Anwendung dieses Gedankens: Erstens lassen die Versuchsbedingungen, unter welchen die elektromotorischen Kräfte des Auges quasistationäre elektrische Ströme erzeugen, keinen sicheren Schluß zu auf die normale Funktion und die Verlaufsart bis in zentrale Felder [und durch sie hindurch [1])]; zweitens sind manche Eigenschaften unseres optischen Wahrnehmens, besonders die dabei vorkommenden Farbmannigfaltigkeiten, schwer mit der Annahme vereinbar, daß nur einfach stationäre Ströme zwischen Retina und zentralen Feldern verlaufen.

196. Die elektromotorischen Kräfte entstehen beim Diffundieren zwischen ungleichartigen benachbarten Elektrolyten, also in einer primären osmotischen Strömung an der Grenze der verschieden erregten Gebiete; osmotische Kräfte könnten auch an der Strömung selbst durch das ganze System hin beteiligt sein. Diffusion allein aber kommt, obwohl sie selbst Raumgestalten bilden kann, als maßgebender stationärer Prozeß im optischen Sektor nicht in Betracht [2]). Eine dritte Möglichkeit ergibt sich aus dem Zusammenwirken von elektrischen und osmotischen Kräften an den Grenzen von verschiedenen Elektrolyten dann, wenn die Leitungsbedingungen im optischen Sektor die Ausbildung quasistationärer elektrischer Ströme durch das ganze System hindurch nicht erlauben. Nähere Überlegung läßt unter solchen Umständen das Auftreten einer oszillatorischen Strömung erwarten, welche in Wellen von Substanzverschiebung und von elektromotorischer Kraft zugleich den optischen Sektor erfüllt. Wir gehen hierauf vorläufig nicht weiter ein, weil wir auf die theoretische Behandlung solcher Erscheinungen noch nicht vorbereitet sind. Es würde vor allem darauf ankommen, das Verhältnis der osmotischen zu den elektrischen Kräften in der Verschiebung zu bestimmen, falls diese eben Wellenform besitzt. Ob das im optischen System wirklich der Fall ist, haben wir oben bereits unentschieden gelassen; die Ant-

[1]) Vgl. unten 220.

[2]) Vgl. hierzu die Ausführungen von G. E. Müller, Zeitschr. f. Psychol. 14, 24.

wort ist experimentell zu geben. Fällt sie positiv aus, so dürfte als Hauptproblem der speziellen Gestaltphysik auf optischem Gebiet die Bestimmung jenes Verhältnisses übrig bleiben [1]).

197. Wir trennen, was wir wissen, von dem, was noch unsicher bleibt, und besprechen einige Eigenschaften des Geschehens, welche aus der Natur der Strömung als elektrischer und Substanzverschiebung von vornherein abzuleiten sind. Denn daß elektrische Kräfte an dem Vorgang teilnehmen, sichert die fortwährende Erfahrung der Nervenphysiologie. Wenn es sich dabei um ähnliche Wellen elektromotorischer Kraft handeln sollte, wie sie in motorischen Nerven beobachtet werden, so sind auch diese eben elektrische Verschiebungen und stimmen deshalb in einer Anzahl wichtiger Eigenschaften mit irgendwelchen elektrischen Strömungen in anorganischen Leitern oder dielektrischen Verschiebungen in Nichtleitern überein. Da aber zweitens keine elektrische Verschiebung in einem Elektrolyten wie dem Nervensystem geschehen kann, ohne daß Substanz als der elektrolytische Stromträger in Form von Ionen oder Kolloidteilen ebenfalls verschoben würde, so ist schon deshalb auch dieser Charakter des Geschehens nicht hypothetisch, und ohne Rücksicht darauf, ob die Strömung oszilliert und in welchem Verhältnis die osmotischen und elektrischen Kräfte dabei stehen, können wir überlegen, welche Folgerungen sich etwa schon so ergeben.

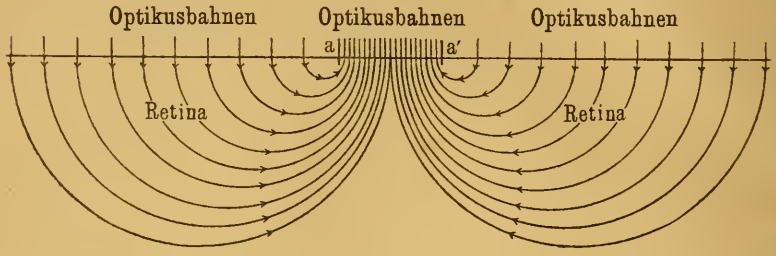
198. 1. Jede elektrische Verschiebung läßt in und um sich ein Magnetfeld entstehen. Das muß auch im Nervensystem gelten, und wenn also eine Strömungsbahn der anderen benachbart verläuft, so durchquert die eine Strömung das Magnetfeld der anderen. Wir haben schon früher gesehen, daß im Fall stationären Geschehens (im engeren Sinn) ein Einfluß auf die Struktur hieraus nicht entsteht, zumal nicht bei so schwachen Strömungen, wie sie im Nervensystem vorkommen können. Die (ebenfalls geringen) ponderomotorischen Kräfte der Magnetfelder haben bei der Fixierung der Bahnen auch keine Bedeutung. Die Frage, ob bei oszillierenden Verschiebungen und also Schwankungen des Magnetfeldes merkliche elektromotorische Kräfte (nichtchemischer Natur) induziert werden, ist nicht ohne weiteres mit Nein zu beantworten; doch wird dergleichen wohl höchstens als nachträgliche Korrektur einzu-

[1]) Eine Erörterung bestehender Theorien der Nervenleitung ist hier nicht am Platze; denn keine von ihnen kann uns z. B. darüber belehren, ob die optische Strömung überhaupt oszilliert, wie die Strömung im motorischen Nerven, für welchen jene Theorien aufgestellt wurden. Über die Wellen in Elektrolyten besitzt auch die reine Physik keine ausreichende Kenntnis; oszilliert also die optische Strömung, dann ist das zu lösende Problem durchaus nicht spezifisch biologisch.

führen sein, wenn wir mit wesentlichen Eigenschaften des Geschehens erst gut bekannt sind.

199. 2. Ganz anders steht es mit der Anwendung des Satzes von der Erhaltung der Elektrizität. Jede elektrische Verschiebung in einem Querschnitt des durchströmten Systems bedeutet äquivalente Verschiebungen in anderen Querschnitten der Bahn, und hieran würde nichts geändert, wenn die Strömung oszillatorischen Charakter haben, und wenn osmotische Kräfte unmittelbar an ihr beteiligt sein sollten. Es folgt, daß eine Verschiebung, deren Bahn an verschiedenen Stellen sehr verschiedene Querschnitte hat, in diesen Querschnitten sehr ungleiche mittlere Strömungsdichte annehmen muß. Wir wollen uns hiervon eine

Fig. 5.



anschauliche Vorstellung machen, indem wir die Überlegung auf das Nervensystem anwenden. Angenommen, wir hätten vor uns auf sonst homogenem, z. B. grauem Grund eine einzige weiße Figur beschränkter Größe und einfacher Form, etwa einen Kreis. Die retinale Abbildung ergibt auf ebenfalls kreisförmigem Gebiet eine Reaktionsart und weithin ringsum eine zweite Reaktionsart, wie die Skizze andeutet. (Daß diese gegenüber der wirklichen Anatomie rein schematisch ist, hat für diese Überlegung keinerlei Bedeutung.) Elektromotorische Kräfte werden bestehen erstens bei a und a', d. h. an der Grenze der ungleich erregten retinalen Gebiete, und zweitens zwischen den erregten Gebieten und den Optikusbahnen. Eine elektrische Verschiebung in diesem einfachen System kann nur den Weg nehmen, welcher schematisch durch Linien mit Pfeilen angegeben ist. (Die Strömungsrichtung, Bewegungssinn der positiven Elektrizität, ist willkürlich angenommen und übrigens gleichgültig.) Nun kommt es auf folgendes an: Durch die homogene Umgebung des Kreises muß im ganzen die gleiche elektrische Verschiebung erfolgen wie durch das retinale Kreisfeld selbst, und da nach Voraussetzung die Figur eine geringe retinale Ausdehnung besitzt, verglichen mit der andersfarbigen Umgebung, so ist die durchschnittliche Strömungsdichte

durch das Kreisfeld hindurch außerordentlich viel größer als durch das Umgebungsfeld. Dieses Verhältnis der elektrischen Verschiebungs- und deshalb Energiedichten muß in den nervösen Bahnen und bis in zentrale Felder erhalten bleiben; dem „Figur"bereich entspricht in dem gestalteten Geschehen, soweit es elektrischer Natur ist, ein weit lebhafterer Zustand als dem weiten „Grund". Überall zwar lagert sich über den sonstigen Energieinhalt der somatischen Felder die gerichtete Energie der elektrischen Verschiebung, aber in der „Figur" oder „Gestalt im engeren Sinn" ist diese Energie gleichsam eng zusammengerafft, im „bloßen Grunde" der gleiche Gesamtbetrag zu geringster Dichte auseinandergebreitet, und man kann sich leicht vorstellen, daß ein solcher Unterschied in psychophysischem Niveau zu einer sehr verschiedenen Art des phänomenalen „Daseins" von „Gestalt" (im engeren Sinn) und „Grund" führt. Hätten wir umgekehrt den Kreis bei gleicher Größe grau und die Umgebung weiß gewählt, so hätte sich zwar der Sinn der elektrischen Strömung umgekehrt, aber der Bereich weitaus größerer elektrischer Energiedichte wäre wieder „die Figur" gewesen. Welches Gebiet als Gestalt im engeren Sinn erscheint, ist also nicht etwa von der absoluten Färbung abhängig.

200. Oben wurde bereits erschlossen, daß die „Gestalten" im engeren Sinn Gebieten hoher psychophysischer Energiedichte entsprechen. Wir verstehen jetzt genauer, weshalb gerade kompakten (einfach geformten) Farbflächen beschränkten Bereiches, wenn sie von sonst homogenem Feld umgeben sind, stets die „Figur" oder „Gestalt" zugehört. Gibt man aber diese Erklärung in so einfachen Fällen, so ist man dazu verpflichtet, sie überall durchzuführen: immer muß das jeweils „gestaltet" (im prägnanten Sinn), fest oder „als Figur" auftretende Gebiet als derjenige Strömungsbereich angesehen werden, in welchem die Gesamtverschiebung des optischen Geschehens stark konzentriert auftritt, während im Gebiet des „Grundes" der gleiche Gesamtbetrag zu einem matten Geschehen weit auseinandergebreitet ist. Das ist die Energiebedingung, welche allen „Gestalten" im engeren Sinn zu ihrem kräftigen phänomenalen Dasein verhilft (vgl. oben 178). Unter weniger einfachen Bedingungen, wenn es sich also nicht um so kompakte Formen handelt, wie z. B. um einen Kreis in übrigens ganz homogener Umgebung, ist als neuer Umstand zu beachten, daß jetzt zusammengehörige Strömungsgebiete nicht mehr notwendig mit Bereichen gleicher Farbe zusammenfallen. Das Beispiel des „Streifengitters" (vgl. oben 168) zeigt das weiße Gebiet zwischen den enger benachbarten schwarzen Strichen in die „Figur" einbezogen,

das ebenso weiße Gebiet in den größeren Abständen und ringsum dagegen ist „bloßer Grund“. Die Konsequenzen für den Verlauf der elektrischen Verschiebung und die Energiestruktur sind leicht zu ziehen [1]).

Es ist von dem elektrischen Vektor der Verschiebung und der ihm entsprechenden Energiedichte die Rede. Nach der eben gegebenen Deutung des Auftretens von „Gestalten“ im engeren Sinn kommt den elektrischen Verschiebungen für die Psychophysik des Raumes entscheidende Bedeutung zu.

Wenn die Form anwächst und ihre Dimensionen schließlich dieselbe Größenordnung annehmen wie das übrige retinale Feld, dann muß nach dieser Deutung der phänomenale Eindruck eine Änderung in der betrachteten Hinsicht erfahren, der Gegensatz von Gestaltfläche und Grundfläche muß sich abschwächen, und das ist auch der Fall; indessen ist diese Erscheinung von komplexerer Natur. — Wird andrerseits die Form (z. B. der Kreis) stark verkleinert und allmählich zum farbig ausgezeichneten Punkt reduziert, so bleibt zwar dessen Vorrang vor einem sonst wirklich homogenen Grund bestehen, aber mit der Verkleinerung der Grenzkurve kommt ein neuer Faktor in Betracht, durch welchen der Punkt schlechter gestellt wird als eine etwas größere Figur unter sonst gleichen Bedingungen.

201. Für Raumgestalten in einem physikalischen System haben wir es als charakteristisch angesehen, daß ihre Momente sich gegenseitig im ganzen und gemäß der vollständigen Topographie ausbilden. Die Erklärung von „Gestalten“ im engeren Sinn („Figuren“) aus dem Gesetz von der Erhaltung der Elektrizität gibt ein einfaches Beispiel hierfür. Denn daß die Energie der elektrischen Verschiebung sich in der Figur so stark zusammendrängt, ist keine Angelegenheit nur desjenigen Topographiebereiches, welcher in der bisherigen Auffassung als das vollständige Reizgebiet der Figur angesehen wird, sondern bestimmt sich nach dem Ausdehnungsverhältnis dieses Reizgebietes zu dem übrigen Gebiet („Grund“), und folgt daraus, daß die beiden Gebiete das gleiche elektrische „Gesamtmoment“ an Verschiebung haben müssen. Deshalb sind wir auch imstande, durch Reizänderungen nur außerhalb des Figurgebietes diesem seinen ausgezeichneten Charakter zu nehmen: verstreuen wir über die Umgebung ringsum einigermaßen ähnlich geformte und ähnlich große Figuren in beträchtlicher Zahl, so geht unserer ersten Figur ihr natürlicher Energievorrang schnell verloren, obwohl „das zugehörige Reizgebiet“ ganz unverändert

---

[1]) Man beachte auch die Folgerung: Wenn bei einer Abbildung von Formen auf der Retina die Stromausbreitung kein Gebiet energetisch genügend auszeichnet, dann wird trotz der gegebenen Formen keine „Gestalt“ (im prägnanten Sinn) gesehen oder herausgehoben, außer etwa nach Eingreifen „innerer Aktivitäten“ des Sehenden. Dergleichen kann vorkommen, wenn man passiv auf Flächen schaut, die mit ganz ungeordneten Formen übersät sind (vgl. auch unten 201).

bleibt[1]). Das optische Dasein eines Gesichtsfeldbereiches hängt in der Tat von dem Zustand des übrigen Feldes ganz unmittelbar ab (vgl. auch das Beispiel 174).

202. 3. Die Strömung verschiebt Substanz. Ist der Vorgang stationär, wie ein gewöhnlicher elektrolytisch geleiteter Gleichstrom, so ändert sich die Konzentration der beteiligten Lösungen an keiner Stelle des durchströmten Systems, welche freie Bewegung des Materials gestattet, also in homogener Bahn; denn die Beträge, die in einer Richtung abströmen, werden aus anderen insgesamt gerade wieder zugeführt (vgl. 107). Nur also, wo sich der Substanzverschiebung Hindernisse bieten, wird der chemische Zustand des Systems durch die Strömung gestört. Dasselbe gilt aber auch noch, wenn die Strömung oszillatorischen Charakter hat, und wenn Stöße veränderter Konzentration in den Bahnen verlaufen; denn die Konzentrationsänderung an jedem Punkt freier Bahn ist dann im Nervensystem notwendig von sehr geringem Betrag und dauert auch nur sehr kurze Zeit an, so daß die chemischen Folgen der Störung ebenfalls nur sehr gering sein können und im allgemeinen vernachlässigt werden dürfen[2]). Ganz anders liegen die Verhältnisse an solchen Unstetigkeitsflächen des Systems, welche die gleichmäßig wandernde oder in Konzentrationsstößen verschobene Substanz gar nicht oder nicht frei zu passieren vermag, an denen also eine Stauung erfolgt. Nur hier entstehen Konzentrationsänderungen oder wachsen die Konzentrationsänderungen zu größeren Beträgen an, und deshalb ist dies der Ort möglicher chemischer Reaktionen[3]). Haben wir also Anlaß, dem gestalteten Geschehen, insofern es Substanzverschiebung ist, irgendwelche stationäre chemische Wirkungen zuzuschreiben, so müssen wir den Ort dieser von der Strömung unterhaltenen Umsetzungen an derartige Stellen verlegen. Als psychophysische Korrelate der farbigen Gesichtsfelderfüllung sehen wir chemische Reaktionen an, welche der Gestaltprozeß unterhält; es folgt, daß sie nur an Unstetigkeitsflächen des leitenden Systems, also des optischen Sektors zustande kommen können. Den farbigen Flächen des phänomenalen oder Gesichtsfeldes entsprechen demnach als Ort zugehörigen psychophysischen Geschehens Strömungsquer-

[1]) Vgl. die Anmerkung zur vorigen Seite.

[2]) Das beste Beispiel hierfür gibt der motorische Nerv, an welchem sich ein Substanzverbrauch (Produktion von CO_2, Sauerstoffbedürfnis) nachweisen läßt, aber eben ein geringer Verbrauch in größeren Zeiten. Ebenso scheint mir die außerordentlich kurze Refraktärzeit des unermüdeten Warmblüternerven darauf hinzuweisen, daß die chemischen Umsetzungen in freier Leitungsbahn von geringer Bedeutung sind.

[3]) Man vergleiche über solche: Nernst, Zur Theorie des elektrischen Reizes, Pflügers Archiv **122**, 275 ff., bes. 280 f., 1908.

schnitte, in denen sich die leitenden Bedingungen abrupt ändern und die Substanzverschiebung behindert wird.

Den Zusammenhang der retinalen chemischen Umsetzungen und der zentralen Farbkorrelate, sowie dieser psychophysischen Prozesse und der elektrischen Verschiebung besprechen wir hier noch nicht, da es für diese Fragen entscheidende Bedeutung hat, ob das gestaltete Geschehen oszilliert oder nicht, und in welchem Maße osmotische Kräfte an dem Vorgang beteiligt sind. Nur das eine kann man von vornherein sagen: Auch der psychophysische Farbprozeß, welcher in dem gestalteten Geschehen örtlich erzeugt wird, ist nicht einfach Funktion der lokalen Retinareaktion, von welcher der betreffende „Stromfaden" ausgeht, sondern wird von der gesamten Topographie retinaler Reaktionen mitbestimmt werden; oder auch: Die farbige Qualität geschener Flächen wird Gestalteinflüssen unterliegen. Wirklich kennt die Psychologie sehr auffallende Erscheinungen dieser Art.

203. Das Geschehen an Unstetigkeitsflächen der Strömungsbahn entspricht den farbigen Flächen des Gesichtsfeldes; damit ist jedoch keineswegs gesagt, daß der Bereich des optisch-psychophysischen Geschehens überhaupt auf jenen Strömungsquerschnitt beschränkt bleibt. Die Raumwahrnehmung und ihre Gestalten weisen ja auch mehr auf als nur farbige Flächen.

Vor allem aber ist vor einem Mißverständnis zu warnen: Welche geometrisch-anatomische Form die Unstetigkeitsfläche hat, an der allein psychophysische Farbreaktionen erfolgen können, hat keine Bedeutung für die Theorie; rein geometrische Bestimmungen können nach ihr niemals Korrelat von irgend etwas Phänomenalem sein. Wir machen uns das an einem Gleichnis klar: Angenommen, der Verlauf der Strömung könnte durch eine Potentialfunktion angegeben werden; dann hat es z. B. unmittelbare Bedeutung für die Theorie, ob ein bestimmter Strömungsquerschnitt eine Fläche konstanten Potentials des Geschehens ist oder nicht, d. h. ob die Momente der Strömung in dem Querschnitt funktionell genau nebeneinander, auf gleicher Front des Geschehens liegen oder nicht; aber ob diese Fläche geometrisch eine Ebene oder irgend eine andere Mannigfaltigkeit im optischen Sektor bildet, ist an und für sich gleichgültig. Worauf es ankommt, wird vielleicht besonders deutlich, wenn man bedenkt, daß eine und dieselbe Unstetigkeitsfläche (an welcher die psychophysischen Farbreaktionen erfolgen) einmal mit einer „Geschehensfront" zusammenfallen, unter anderen Bedingungen aber Strömungsmomente aus verschiedenen Geschehensfronten nebeneinander enthalten könnte. Die Geometrie der anatomischen Unstetigkeitsfläche bleibt dann dieselbe, aber die funktionelle Struktur der Strömungsgestalt nicht, und nur auf diese kommt es für die Bewußtseinskorrelate an, welche einem funktionellen „Nebeneinander", einem „Vor" und „Zurück" in dem gestalteten Geschehen (aber nicht im anatomisch-geometrischen Gehirnraum) etwa entsprechen mögen[1]). Das ist später bei der Theorie der dreidimensionalen Raumgestalten zu beachten.

[1]) Wie man sieht, kommen wir von der Theorie physischer Gestalten zu einer gänzlich anderen Behandlung dieser Frage, als von der Hypothese der sogenannten Retinaprojektion aus der gewöhnliche Gedankenweg ist.

204. 4. Auf die rein polarisatorischen Einwirkungen der Strömung an Unstetigkeitsflächen gehe ich noch nicht ein, da die Phänomenologie der zugehörigen Bewußtseinsvorgänge bisher wenig entwickelt ist. Das Nervensystem ist durch Ströme im höchsten Maß polarisierbar (L. Hermann), und so dürfte jenen Wirkungen auch für optische Gestalten die größte Bedeutung zukommen.

Drittes Kapitel.

Das Webersche Gesetz.

205. Wir kehren zu dem Fall zurück, daß eine kompakte Fläche beschränkter Ausdehnung (etwa ein Kreis) sich in der Färbung von der übrigens homogenen Umgebung unterscheidet. Daß dann im Gesichtsfeld eine „Gestalt" (im engeren Sinn) auftritt, wurde aus der Natur der elektrischen Verschiebung abgeleitet, welche in gleichem Gesamtbetrag und also sehr verschiedener mittlerer Dichte das Gebiet des weiten „Grundes" einerseits und die „Figur" andrerseits durchquert. Welche Dichte der Verschiebung dabei erreicht wird, hängt aber außer von den Ausdehnungen der Gebiete von einem zweiten Faktor ab, und zwar der objektiven Verschiedenheit der beiden Farbreaktionen. Wird die Farbe der Umgebung der Farbe der Figur allmählich immer ähnlicher gewählt, so zeigt die Beobachtung, daß die Lebhaftigkeit allmählich sinkt, mit der sich die Figur „vom Grunde abhebt", und am Ende wird eine Grenze erreicht, bei welcher die Figur im Grunde untergeht; die „Gestalt" verschwindet, wenn der Farbenunterschied kleiner wird als die sogenannte Unterschiedsschwelle für die betreffenden Bedingungen.

206. Es ist nicht schwer, das Verhalten der elektrischen Verschiebung in einem solchen Fall zu verstehen. Jede Art elektrischer Strömung hängt jedenfalls von den elektromotorischen Kräften im somatischen Felde ab, und diese bestimmen sich, wie im ersten Abschnitt gezeigt wurde, nach der Abweichung aneinandergrenzender Farbreaktionen voneinander. Kommen die Farben im Felde sich qualitativ sehr nahe, so sinkt die elektromotorische Kraft immer mehr und mit ihr überall die Intensität der elektrischen Verschiebung. — Nun muß in Elektrolyten, wenn sie von

---

Diesen hat G. E. Müller (Zeitschr. f. Psychol. usw. 10, 11 f.) gewiß mit gutem Grund kritisiert, unsere Auffassung treffen seine Bedenken nicht (vgl. auch unten 230 ff.).

Unstetigkeitsflächen so reichlich durchzogen sind wie das Nervensystem, im allgemeinen ein Mindestwert elektromotorischer Kräfte erreicht werden, ehe die reguläre Strömung sich ausbilden kann[1]). Eine elektrische Verschiebung, deren Verlauf (im ganzen) sich nach elektromotorischen Kräften zwischen ungleichen Farbreaktionen richtet, wird also nicht mehr zustande kommen, sobald die Abweichung der Farben voneinander unter eine gewisse Schwelle gesunken ist. Bei dieser Schwelle hat dann die elektromotorische Kraft einen bestimmten Wert, und wir wollen dessen Abhängigkeit von den Farbreaktionen näher bestimmen[2]). — Damit nehmen wir eine Untersuchung wieder auf, die im ersten Abschnitt unvollständig geblieben ist.

207. Dort wurde die Unterscheidung von Reaktionstypen eingeführt (8), ohne welche ja die stärksten vorkommenden Verschiedenheiten von Farbarten chemisch nicht verständlich werden. In Reaktionen von ungleichem Typus gehen (mindestens teilweise) verschiedene Moleküle, insbesondere Ionen ein, derart, daß sich Gebiete ungleicher Reaktionsart nicht allein durch die Konzentrationen, sondern auch die chemische Natur und die Wanderungsgeschwindigkeit ihrer Ionen voneinander unterscheiden. — Stationäre Umsetzungen beiderseits gleicher Reaktionsart, aber ungleicher Reaktionsgeschwindigkeit dagegen weichen nur in der Konzentration irgendwelcher Ionen voneinander ab. Diesen Fall wählen wir als einfachstes Beispiel für eine erste Berechnung der Schwelle und setzen weiter voraus, daß in den beiden aneinandergrenzenden Gebieten ein und dasselbe einwertige Ionenpaar, aber beiderseits mit denjenigen ungleichen Konzentrationen gegeben sei, welche den beiden verschiedenen Reaktionsgeschwindigkeiten entsprechen. Das ist die erste der früher (13) angeführten Möglichkeiten; der Fall nichtbinärer Elektrolyte (und nicht durchweg einwertiger Ionen ist der hier interessierenden Eigenschaft nach mit dem zu behandelnden Beispiel identisch.

208. Da Nernst in der Theorie galvanischer Ketten (1888/89) von eben diesem Fall ausgegangen ist und den Potentialsprung zwischen artgleichen Lösungen ungleicher Ionenkonzentration aus ihrer Diffusion abgeleitet hat, so kann diese Berechnung einfach übernommen werden.

An der Berührungsfläche zweier Gebiete ungleicher Ionenkonzentration betrachten wir ein Flächenelement q, bezeichnen die

---

[1]) Nernst, Theoretische Chemie (7. Aufl.), S. 790 f.; Starke, Experimentelle Elektrizitätslehre (2. Aufl.), S. 152 f.

[2]) Die Art des Gedankenganges ist hier ganz ähnlich wie bei Nernst, Pflügers Archiv **122**, 278, nur daß es sich dort um eine absolute Reizschwelle handelt.

Richtung der Normalen zu diesem Element mit n, und stellen uns Konzentration und osmotischen Druck nicht unstetig, sondern in Richtung n äußerst schnell, aber stetig variierend vor. Die Geschwindigkeit des positiven Ions unter dem Einfluß einer Kraft 1 pro Grammion (d. i. die „Beweglichkeit") sei U, die des Anions V. Den osmotischen Partialdruck jedes Ions nennen wir p (und das ist also eine längs n schnell variierende Größe), — das elektrostatische Potential (auf ein Grammion als Einheit der Elektrizitätsmenge bezogen) wird mit Φ bezeichnet [1]). — Die Ionen unterliegen Kraftwirkungen, die einerseits auf die räumliche Variation von p, andererseits auf die von Φ zurückgehen; da es sich aber um Bewegungen bei enormer Reibung handelt, sind den wirkenden Kräften die Geschwindigkeiten proportional. Wenn c die Ionenkonzentration am Querschnitt q ist, und die Kraft 1 pro Grammion die sehr kurze Zeit dt hindurch senkrecht zu q wirkt, so wandern in dieser Zeit durch q und in der Richtung der Normalen die Substanzmengen:

$$-Uqc.dt \quad \text{und} \quad -Vqc.dt \text{ (des Kations und des Anions).}$$

In Wirklichkeit ist die Kraft osmotischen Ursprungs für ein Grammion $\frac{1}{c}\cdot\frac{dp}{dn}$ und die elektrostatische Kraft $\pm\frac{d\Phi}{dn}$; also werden die abwandernden Beträge unter dem Einfluß beider Kräfte zusammen:

$$-Uq\left(\frac{dp}{dn}+\frac{d\Phi}{dn}\cdot c\right)dt \quad \text{und} \quad -Vq\left(\frac{dp}{dn}-\frac{d\Phi}{dn}\cdot c\right)dt.$$

Eine Scheidung der beiden Ionen kann nur in unwägbarer Menge geschehen; denn es muß sich in kürzester Zeit ein stationärer Zustand herstellen, bei welchem die entstehende elektrostatische Kraft zwischen beiden das vorauseilende Ion so stark zurückhält, das zurückbleibende so stark antreibt, daß beide die gleiche Geschwindigkeit annehmen, die beiden eben bestimmten abwandernden Ionenmengen also denselben Betrag darstellen. — Daraus ergibt sich die Gleichung

$$\frac{d\Phi}{dn}=-\frac{U-V}{U+V}\cdot\frac{1}{c}\frac{dp}{dn}.$$

In verdünnten Lösungen gilt aber die Zustandsgleichung der idealen Gase

$$p=cRT,$$

wo R die Gaskonstante, T die absolute Temperatur und p anstatt des Gasdruckes der osmotische Druck ist. Führt man demgemäß c

[1]) Ich nenne das Potential nicht V, weil diese Bezeichnung hier, wie in der Physik üblich, die Beweglichkeit des Anions bedeutet.

anstatt p als unabhängige Variable ein, so folgt für den Potentialsprung zwischen Teilfeldern von den Ionenkonzentrationen c_1 und c_2:

$$\Phi_1 - \Phi_2 = -\frac{U-V}{U+V} R\,T \int_{c_2}^{c_1} \frac{dc}{c} = \frac{U-V}{U+V} R\,T \ln \frac{c_2}{c_1}.$$

Hier bedeutet *ln* den natürlichen Logarithmus; für die Gaskonstante R ist der Wert $0{,}861 \cdot 10^{-4}$ einzusetzen, wenn die elektromotorische Kraft in Volt ausgedrückt werden soll [1]).

Die Korrekturen, welche vorzunehmen sind, wenn es sich nicht um einwertige Ionen handelt, findet man z. B. angegeben bei Starke, Experimentelle Elektrizitätslehre (2. Aufl.), S. 175, 1910.

Außer dieser Ableitung, die sehr konkrete Vorstellungen verwendet, hat Nernst (1889) eine zweite gegeben, welche die Grundsätze der Thermodynamik, die Zustandsgleichung, sowie die experimentell bestimmten Ionenbeweglichkeiten voraussetzt, und sehr einfach zu demselben Ergebnis führt. Die Theorie wurde seither vielfach im Versuch bestätigt. — Auf die elektromotorischen Kräfte in der alterierten Muskelsubstanz ist der Nernstsche Ausdruck von Physiologen angewandt worden [2]), dagegen habe ich nicht finden können, daß er auf Potentialsprünge zwischen ungleich erregten Teilgebieten von Sinnesflächen (Retina) oder nervösen Feldern übertragen worden wäre.

209. Wir wissen nicht, ob in somatischen Feldern Reaktionen vorkommen, bei welchen nur ein Ionenpaar (oder etwa ein Ionentripel) seine Ruhekonzentration ändert; es könnten auch an allen Reaktionen im Nervensystem mehrere Ionenpaare beteiligt sein. Trotzdem verlohnt es sich, gerade diese sehr einfache Gleichung ihrer Form wegen zu betrachten und sie zu behandeln, als entspräche sie einer konkreten Reaktionsart, die in zwei Nachbargebieten eines somatischen Feldes mit verschiedener Reaktionsgeschwindigkeit, und zwar mit den ungleichen Ionenkonzentrationen c_1 und c_2 verläuft. — Führt man statt des natürlichen den Briggschen Logarithmus (log) ein, so ist der Ausdruck für die elektromotorische Kraft mit einer Konstanten (Modul) zu multiplizieren. Die absolute Temperatur hat im Nervensystem einen festen Wert, nahezu unabhängig von lokalen Reaktionen (vgl. 6), U und V sind bei einer gegebenen Temperatur Charakteristika der Ionenart, also im vorliegenden Fall auch feste Zahlen. Da es uns nur auf die Abhängigkeit des Potentialsprunges von den Variablen ankommt, können wir also schreiben:

$$\Phi_1 - \Phi_2 = \text{const.} \log \frac{c_2}{c_1},$$

[1]) Vgl. Nernst, Theoretische Chemie (7. Aufl.), S. 396 ff., 778 ff.
[2]) Nagels Handb. d. Physiol. IV, 2, 524 f. (von Frey).

und haben das Weber-Fechnersche Gesetz in der uns geläufigen Form vor uns. Der Ausdruck bestätigt frühere Angaben (vgl. 25). Die elektromotorische Kraft zwischen den aneinandergrenzenden Teilfeldern ist Null, wenn in beiden die Ionenkonzentration dieselbe, d. h. wenn die Reaktionsgeschwindigkeit dieselbe, oder endlich, wenn die Farben beiderseits gleich sind. Werden die Farben (Reaktionsgeschwindigkeiten) mehr und mehr ungleich, so wächst die elektromotorische Kraft immer mehr an, aber allmählich langsamer, wie die Form der logarithmischen Funktion angibt. Die elektromotorische Kraft ändert ihre Richtung nur, wenn der Sinn des Farbenunterschiedes (des Unterschiedes der Konzentrationen) sich umkehrt

$$\left[\log \frac{c_2}{c_1} = \log c_2 - \log c_1\right],$$

und wächst in diesem Fall ebenso nach der entgegengesetzten Richtung. — Man sieht ferner, daß der Betrag des Potentialsprunges nicht von den absoluten Konzentrationen, sondern von deren Verhältnis abhängt: Wird die Konzentration beiderseits z. B. verdreifacht — was gänzlich veränderten Reaktionsgeschwindigkeiten und also „absoluten Farben“ entspricht —, so ist die elektromotorische Kraft noch immer dieselbe; sie kann im prägnanten Sinn (der Psychologie) transponiert werden.

210. Eine elektrische Verschiebung, deren Verlauf sich nach der elektromotorischen Kraft richtet, soll immer dann zur Ausbildung kommen, wenn der Potentialsprung zum mindesten einen gewissen Schwellenwert ε erreicht, der eine bestimmte Zahl z. B. von Mikrovolt ist. Also muß $\log \frac{c_2}{c_1}$ ebenfalls zu einem gewissen Schwellenwert $\frac{\varepsilon}{\text{const.}}$ ansteigen, oder auch: das Verhältnis $\frac{c_2}{c_1}$ ist auf einen Mindestwert zu bringen. Stellen wir uns zunächst beide Gebiete gleich erregt vor, so ist c_2 gleich c_1; lassen wir c_2 bei konstantem c_1 allmählich wachsen, so sei der Schwellenwert erreicht, bei einem gewissen $c_2 = c_1 + \Delta c_1$, und $\frac{c_1 + \Delta c_1}{c_1}$ $\left(\text{deshalb auch } \frac{\Delta c_1}{c_1}\right)$ sei also ein Verhältnis, bei welchem der Potentialsprung gerade eben die Verschiebung in seiner Richtung veranlaßt. Man sieht ohne weiteres, daß, wenn die (beiderseits gleiche) Ausgangskonzentration z. B. 10 mal größer genommen wird, auch der Zuwachs Δc 10 mal größer werden muß, der das Verhältnis $\frac{c + \Delta c}{c}$ $\left(\text{und deshalb auch } \frac{\Delta c}{c}\right)$ gerade wieder auf denselben Betrag, die elektromotorische Kraft also auf den gleichen Schwellenwert bringt wie im ersten Fall.

Das heißt aber nichts anderes, als daß für den erforderlichen Potentialsprung in seiner Abhängigkeit von den Konzentrationen das Webersche Gesetz gilt, oder daß die relative Unterschiedsschwelle für die Ionenkonzentrationen, bestimmt nach dem Verhalten der elektrischen Verschiebung, konstanten Wert hat.

211. Wie ist das Schwellengesetz in anderen Konstellationen beschaffen? Der nächst einfache Fall ist (13) der, daß in jedem Teilgebiet wiederum ein Ionenpaar mit irgend einer Konzentration auftritt, daß aber die Ionenarten zu beiden Seiten verschieden, also einerseits die Ionenbeweglichkeiten U_1 und V_1, andrerseits U_2 und V_2 sind. Die Integration hat für diesen Fall Planck ausgeführt; als Ausdruck des Potentialsprunges ergibt sich

$$\Phi_1 - \Phi_2 = \text{const.} \log x,$$

wo const. eine andere Konstante ist als bei der vorigen Konstellation, und x bestimmt werden muß aus:

$$\frac{x\frac{c_2}{c_1}U_2 - U_1}{\frac{c_2}{c_1}V_2 - xV_1} = \frac{\log\frac{c_2}{c_1} - \log x}{\log\frac{c_2}{c_1} + \log x} \cdot \frac{x\frac{c_2}{c_1} - 1}{\frac{c_2}{c_1} - x}$$ [1]).

Die Behandlung dieser transzendenten Gleichung ist im Einzelfall recht unbequem; aber das, worauf es hier allein ankommt, sieht man ihr ohne weiteres an: Nur das Verhältnis der Konzentrationen tritt in ihr auf. Stets also, wenn dieses Verhältnis einen bestimmten Wert hat, ergibt sich (bei unveränderlichen U_1, V_1, U_2, V_2) derselbe Betrag für x und $\log x$, also auch die gleiche elektromotorische Kraft, unabhängig von den absoluten Konzentrationen. Soll der Potentialsprung bei verschiedenen absoluten Konzentrationen einen gewissen Schwellenwert erreichen, so muß, formal genau wie im vorigen Fall, das Verhältnis der Konzentrationen jedesmal auf einen Mindestwert steigen, d. h. es gilt wieder für die Abhängigkeit von den Konzentrationen das Webersche Gesetz.

Die Theorie hat sich in diesem Fall ebenso bestätigt wie im ersten. — Für $U_1 = U_2$ und $V_1 = V_2$ geht der Ausdruck natürlich in den für die erste Konstellation über. Andrerseits besteht ein wesentlicher Unterschied darin, daß für artverschiedene Lösungen auch bei gleicher Konzentration beiderseits eine elektromotorische Kraft auftritt; es handelt sich eben um qualitativ verschiedene Ionenpaare (Farben und Reaktionen). Diese elektromotorische Kraft bei gleichen Konzentrationen wäre

$$\Phi_1 - \Phi_2 = \text{const.} \log \frac{U_1 + V_2}{U_2 + V_1}$$

und könnte unter Umständen sehr beträchtlichen Wert haben.

[1]) Vgl. Nernst u. Schoenflies, Mathematische Behandlung usw. (7. Aufl.), S. 305, 1913.

212. Ob der nächst komplexere Fall bereits rechnerische Behandlung gefunden hat, ist mir nicht bekannt. Er würde darin bestehen, daß in beiden Teilfeldern zwei Ionenpaare, und zwar beiderseits dieselben Arten, aber mit verschiedenen Konzentrationen vorhanden sind. Thermodynamische Gründe führen zu der Vermutung, daß bei der Berechnung solcher Potentialsprünge wiederum die Verhältnisse der Konzentrationen auftreten werden, entweder in der Form $\frac{c_1 + c_2}{c_1}$ usw. oder als $\frac{c_2}{c_1}$ usw. nebeneinander. Da hier alle vier Konzentrationen variieren können, von vornherein aber keine der Variationsarten den Vorzug vor den anderen verdient, so wird ein Schwellengesetz von der einfachen Form des Weberschen Gesetzes nicht bestehen, sondern höchstens ein weniger einfaches Analogon. Ähnliches würde von noch komplexeren Fällen gelten.

213. Überblickt man alle möglichen Kombinationen von je zwei Farben, die im Gesichtsfeld als Nachbarn auftreten können, so findet sich darunter eine Reihe, für die der Form nach innerhalb recht weiter Grenzen genau dasselbe Gesetz gilt wie für die zwei eben an erster Stelle behandelten Kombinationen von je zwei im somatischen Felde stationär reagierenden Elektrolyten. Zwar müssen auch zwei beliebige Farbreize, die benachbarte Reaktionen hervorbringen, bis zu einem gewissen Mindestwert, der betreffenden Unterschiedsschwelle, voneinander verschieden sein, damit phänomenal zuerst das Bewußtsein eines „Zueinander“ oder auch einer „Verschiedenheit“ der beiden auftritt. Aber nur für die tonfreien Farben, soviel wir wissen, ist dabei die relative Unterschiedsschwelle oder auch das Verhältnis der Reize immer[1]) dasselbe, wenn bei wechselnden absoluten Intensitäten der Strahlung phänomenal aus dem homogenen Felde gerade eben ein „tonfreies Farbenzueinander“, wenn der „Helligkeitsunterschied“ gerade eben merklich werden soll.

214. Die zum Teil sehr begründete Kritik, welche die Fechnersche Auffassung und theoretische Weiterverwendung des Weberschen Gesetzes findet, hat unglücklicherweise dieses selbst etwas unbeliebt gemacht. Dabei ist es der Ausdruck einer Erfahrung, die zwar verschieden gedeutet, aber von keinem der Angriffe getroffen werden kann, welchen das sogenannte Fechnersche Gesetz unterliegt, außer dem einen, daß es im konkreten Falle mehr oder weniger genaue experimentelle Bestätigung fände. In dieser Hinsicht ist seine Bewertung auf dem Gebiete der tonfreien Farben danach vorzunehmen, daß in einem bestimmten Bereich der abso-

[1]) D. h. innerhalb der Gültigkeitszone des Gesetzes (vgl. unten 214 f.).

luten Lichtstärke, der einer Variation reichlich im Verhältnis 1:50 entspricht, die relative Unterschiedsschwelle so konstant ist, wie es z. B. ein Physiker für genügend als Bestätigung unter schwierigen Versuchsbedingungen ansehen würde. Wenn aber in einem so großen Bereich der variierten Größen ein sehr einfaches Gesetz sich bestätigt, dann wäre es höchst ungeschickt, wegen der gewiß starken und sehr starken Abweichungen, die außerhalb jener Gültigkeitszone auftreten, auch die Bestätigung in dieser Zone gering zu achten, zumal jene Abweichungen so auffallend bei bestimmten Intensitäten der Lichter merklich werden, daß der Physiker da sofort auf ganz neu hinzukommende Faktoren schließen müßte.

Nach einem recht verbreiteten Vorurteil muß ein Naturgesetz sich für beliebige Werte der Variablen bewähren, um als solches und nicht als bloße Regel anerkannt zu werden. Allerdings denkt kein Naturforscher so: „Wir wissen gegenwärtig, daß alle Naturgesetze immer nur für bestimmte Gebiete gelten, und daß man immer an Grenzen des Gültigkeitsbereiches gelangt, wenn man die in Betracht kommenden Variablen in der einen oder anderen Richtung weitgehend verändert.“ Diesen Worten schließt Nernst die Erörterung eines der wertvollsten physikalischen Gesetze als Beispiel an und zeigt, wie bei starker Veränderung der Bedingungen gänzlich neue Faktoren zu starken Abweichungen führen, und wie doch der Wert des Gesetzes in der Zone seiner Bestätigung hiervon gar nicht berührt wird, auch der theoretische Wert nicht[1]).

215. Auf dem Gebiete der tonfreien Farben macht man sich auf folgende Art einfach und anschaulich klar, daß eine Bestätigung im Variationsbereich 1:50 der absoluten Lichtstärke Gültigkeit in einem recht großen Gebiete ist. Die Remissionsvermögen von „mattem, tiefschwarzem“ Papier und frisch gefallenem Schnee verhalten sich wie 1:40[2]). Wenn man also, etwa bei bedecktem Himmel am Mittag und jedenfalls unter sonst gleichen Bedingungen, den Schnee und das Papier betrachtet, so verhalten sich auch die abbildenden Lichtstärken wie 1:40; dabei erscheinen die Farben als schneeweiß und schwarz, also den möglichen Extremen der tonfreien Reihe sehr nahe. Der Gültigkeitsbereich des Weberschen Gesetzes ist demnach ungefähr so groß wie eine Zone von Lichtstärken, mit welcher wir uns am Tage praktisch die ganze tonfreie Reihe (im phänomenalen Sinne) vorführen können.

216. Da die physikalische Theorie der inhomogen erregten Felder auf das Webersche Gesetz gerade an die Stelle führt, wo dasselbe in formal vollkommener Übereinstimmung von der sinnespsychologischen Forschung längst gefunden ist, so kann wohl kein Zufall vorliegen. Den tonfreien Farben, deren relative Unter-

---

[1]) Theorie des elektrischen Reizes a. a. O., S. 309 ff.

[2]) Mitteilung des Herrn cand. phil. M. Uibe nach Zöllner, Photometr. Unters. 1865.

schiedsschwelle konstant ist, wird man vielmehr diejenigen Reaktionstypen zuordnen, für welche die Schwelle der elektrischen Verschiebung dem gleichen Gesetz folgt. Dies ist nur bei zwei sehr einfachen Konstellationen der Fall (212), zwischen denen wir also zu wählen haben. Man sieht aber sofort, daß das oben an zweiter Stelle behandelte Paar von Elektrolyten nicht ernstlich in Betracht kommt: Denn es erscheint widersinnig, zwei benachbarte Schattierungen der tonfreien Reihe als phänomenale Korrelate zweier Reaktionen von beiderseits ganz verschiedenen Molekülarten anzusehen; würde doch z. B. bei gleicher Konzentration beiderseits eine beträchtliche elektromotorische Kraft bestehen können u. dgl., die tonfreien Farben würden eben nicht in einer chemischen Reihe liegen. Danach bleibt nur die erste Konstellation übrig, und wir müssen folgern, daß die tonfreie Farbenreihe den verschiedenen Reaktionsgeschwindigkeiten (verschiedenen stationären Reaktionen) und damit verschiedenen Konzentrationen eines Reaktionstypus entspricht, an welchem nur ein Ionenpaar (oder Ionentripel) stets derselben Art teilnimmt. In diesem Falle bedeutet das Aneinandergrenzen zweier tonfreien Farben im Gesichtsfelde die Berührung zweier stationär reagierender Elektrolyte von ungleicher Konzentration, aber von gleichen Ionenarten; ein phänomenales Zueinander tonfreier Farben wird dann ausgebildet, wenn die elektromotorische Schwelle für die gerichtete Verschiebung erreicht ist. Das Webersche Gesetz für diese Schwelle wird aber nur dann identisch mit der psychologischen Gesetzmäßigkeit dieses Namens, wenn in dem betreffenden Felde die Ionenkonzentrationen stationärer Umsetzungen der Intensität der Lichtreize proportional sind. Nennen wir nämlich die Strahlungsintensität, die eine Teilregion der Retina trifft, R_1 und die Strahlung im Nachbargebiete R_2, werden ferner durch diese Strahlungen stationäre Reaktionen im Felde unterhalten, welchen die Ionenkonzentrationen

$$c_1 = \alpha R_1 \quad \text{und} \quad c_2 = \alpha R_2$$

zugeordnet sind, so ergibt sich:

$$c_1 : c_2 = R_1 : R_2,$$

da α die Proportionalitätskonstante bedeuten soll. Die relative Unterschiedsschwelle hat dann nicht nur in der Form $\frac{\Delta c}{c}$, sondern auch als $\frac{\Delta R}{R}$, auf die Reize bezogen, einen konstanten Wert. — Wie man sieht, wird die Theorie durchführbar, wenn man in jeder Hinsicht die einfachsten Voraussetzungen macht: Der tonfreien Farbenreihe soll eine Reihe von Reaktionen des gleichen Typus

(am gleichen Material) entsprechen; die Reaktionsart — soweit Ionen an ihr beteiligt sind — soll die einfachste sein, die vorkommt, denn nur die Konzentration eines Ionenpaares (oder -tripels) soll dabei variieren; die Abhängigkeit vom Reiz soll die einfachste mögliche Form, die der Proportionalität zwischen Lichtstärke und (stationär konstant erhaltener) Konzentration sein, immer in dem Bereich, für welchen das Webersche Gesetz sich wirklich bestätigt.

217. Hieran läßt sich eine ungefähre Berechnung der Schwelle in physikalischem Maße schließen, derart, daß die quantitativen Folgerungen der Theorie wenigstens der Größenordnung nach bestimmt werden. In der Nernstschen Gleichung

$$\Phi_1 - \Phi_2 = \frac{U-V}{U+V} \cdot R T \ln \frac{c_2}{c_1}$$

ist T, die absolute Temperatur des Zentralnervensystems, als $273 + 37$ oder 310^0 bekannt, die Gaskonstante R hat für eine Berechnung in Volt den Wert $0{,}861 \cdot 10^{-4}$; im Gültigkeitsbereich des Weberschen Gesetzes muß endlich der Quotient $\frac{c_2}{c_1}$ gleich dem Verhältnis zweier Lichtstärken sein, die gerade eben ein „Farbenzueinander" im phänomenalen Sinne erzeugen, eben „unterscheidbare Farben" geben. Da für unmittelbar aneinandergrenzende, tonfrei gefärbte Teilfelder die relative Unterschiedsschwelle des Gültigkeitsbereiches ungefähr als 0,01 angenommen werden kann, so ist demnach $\frac{c_2}{c_1}$ gleich 1,01 zu setzen. Dagegen ist uns nicht bekannt, welche Werte die Beweglichkeiten U und V der „tonfreien Ionen" haben, und nur für den ganzen Faktor $\frac{U-V}{U+V}$ besteht aus elementaren mathematischen Gründen eine obere Grenze: sein absoluter Betrag kann nicht über 1 ansteigen und nähert sich diesem Wert, wenn die Beweglichkeit eines Ions sehr groß gegen die des anderen ist. (Handelte es sich z. B. um die Ionen einer einbasischen organischen Säure, so könnte das Kation $\overset{+}{H}$ bis 16 mal schneller wandern als das Anion, und der Wert von $\frac{U-V}{U+V}$ würde etwa 0,9.) Da es uns vorläufig nicht auf das Vorzeichen der elektromotorischen Kraft ankommt, setzen wir also für $\frac{U-V}{U+V}$ den Betrag 1 ein und finden unter denjenigen Beträgen der Schwelle, welche sie — je nach den wahren, aber unbekannten U und V — wirklich haben könnte, den oberen Grenzbetrag, über

den sie sich nach der Theorie und nach dem zugrunde gelegten Befund des sinnespsychologischen Experimentes nicht erheben kann. Auf diese Weise ergibt sich als Wert der Schwelle:

$$0{,}861 \,.\, 10^{-4} \,.\, 310 \,.\, ln\ 1{,}01 = 3 \,.\, 10^{-4}\ \text{Volt}.$$

Höher kann also die elektromotorische Schwelle des tonfreien Farbenzueinanders nicht sein, welche der optisch-experimentell gefundenen Unterschiedsschwelle von 0,01 entspricht, wohl aber kleiner, wenn die Werte der wahren U und V näher beieinander liegen. Die Größenordnung stimmt gut zu dem, was nach dem sonstigen elektromotorischen Verhalten des Organismus zu erwarten war. So scheinen die elektromotorischen Gesamtwirkungen kräftiger Belichtung z. B. im Auge des Frosches (bei Zimmertemperatur) maximal auf ungefähr $4 \,.\, 10^{-3}$ Volt anzusteigen.

Da das Nervensystem, vor allem auch die Retina, bei Erregung sauer reagiert, so ist $\overset{+}{H}$ als freies Ion bei den Reaktionen anzunehmen, und es wäre bei dem großen quantitativen Abstande aller anderen Ionenbeweglichkeiten von der des Wasserstoffs möglich, daß die elektromotorische Schwelle sich dem berechneten Wert (von unten) nähert. Wenn indessen ein zweiwertiges Ion an der Reaktion teilnehmen sollte, so wäre noch eine Korrektur an der Rechnung erforderlich; sie könnte die Größenordnung nicht ändern[1]).

218. Da das Webersche Gesetz für die elektrische Verschiebung und für die Unterscheidung tonfreier Farben nur dann ineinander übergehen, wenn die jeweils im stationären Zustande konstante Ionenkonzentration der Lichtintensität proportional ist, so fragt es sich also, mit welcher Wahrscheinlichkeit ein so einfaches Gesetz für irgend ein somatisches Feld gelten kann. Unzweifelhaft darf man einen so einfachen Zusammenhang eher erwarten für ein Feld, dessen Zustände unmittelbar von der Lichtreizung abhängen, als für ein solches, welches nur indirekt und nach Zwischenprozessen von den Lichtern beeinflußt wird; die Wahrscheinlichkeit wird also am größten für die Retina. Es ist gar keine gewagte Hypothese, daß die Lichter innerhalb eines mittleren Intensitätsbereiches „tonfreie retinale Reaktionen“ stationär derart unterhalten, daß die jedesmal dabei konstante Konzentration den Lichtern proportional ausfällt[2]). Insoweit das Verhalten der Strömung von der Retina aufwärts durch die elektromotorische Kraft bestimmt wird, folgt dann, daß zentrale und psychophysische Farbprozesse, welche das gestaltete Geschehen weiterhin (an Unstetigkeitsflächen) unterhält, sicher nicht einfach den Lichtstärken gemäß verlaufen, überdies aber in jedem Bereiche von den Farbenreaktionen der ganzen Retina abhängen.

[1]) Vgl. Starke, a. a. O. S. 175.

[2]) Ähnlich scheint es z. B. mit der Stärkebildung in grünen Blättern als Funktion ebenfalls der Strahlungsintensität zu stehen.

219. Die bisherigen Ergebnisse elektrophysiologischer Untersuchungen an der Retina bestätigen den Grundgedanken der hier entwickelten Anschauung in dem wichtigsten Punkte. Es ist bekannt, daß diese Forschungen, obwohl sie zu einem großen Teile nicht einmal an Warmblütern, sondern an isolierten Froschaugen und Froschretinae vorgenommen wurden, eine frappante Übereinstimmung zwischen dem elektromotorischen Verhalten des Auges und manchen Gesetzen der menschlichen Farbenwahrnehmung festgestellt haben. Die adaptative Empfindlichkeitssteigerung im Dunklen, das Purkinje-Phänomen und speziell die Verschiebung des Empfindlichkeitsmaximums, das Talbotsche Gesetz bis ins einzelne lassen sich mit dem Galvanometer vollkommen bestätigen. Nachdem einige Autoren früher erkannt hatten, daß die entstehenden elektromotorischen Kräfte durchaus nicht den Strahlungsintensitäten proportional anwachsen, sondern viel eher einen Anstieg mit dem Logarithmus der Strahlungsintensität erkennen lassen, hat de Haas in einer schönen Untersuchung[1]) den Nachweis geführt, daß bei sehr schwachen Belichtungen diese Gesetzmäßigkeit nicht besteht und ebensowenig bei sehr starker Strahlung, daß aber in einer bestimmten und größeren Zone, welche einer Variation ungefähr wieder im Verhältnis 1 : 50 entspricht, die elektromotorische Kraft sehr genau mit dem Logarithmus des Reizes ansteigt[2]). Ein logarithmisches Gesetz, wie es oben im Anschluß an die Nernstsche Theorie galvanischer Ketten abgeleitet wurde, gilt also für einen beträchtlichen Intensitätsbereich und gerade den peripheren Teil des optischen Systems wirklich.

De Haas prüfte nicht ganz die Frage, von welcher bisher die Rede war; er maß nicht Unterschiedsschwellen, sondern das Verhalten des elektromotorischen Belichtungseffektes im ganzen bei einer Reihe verschiedener Strahlungsintensitäten, wenn jedesmal in gleicher Weise von Cornea und hinterer Bulbuswand zum Galvanometer abgeleitet wurde[3]). Eine solche Messungsart wird in jedem Fall die Resultante mehrerer elektromotorischer Kräfte (den von ihnen zusammen erzeugten Strom) feststellen, und zwar vermutlich einen Potentialsprung zwischen dem direkt belichteten Retinagebiet und den vom Licht nicht erheblich (nur durch zerstreute Strahlung) veränderten Bereichen der Sinnesfläche, sowie andere Potentialsprünge zwischen der erregten Substanz und ihrer sonstigen Umgebung[4]). Das

---

[1]) Lichtprikkels en Retinastroomen usw. Leidener Diss. 1903.

[2]) Nur die Ergebnisse von Tabelle 24 und Fig. 5 (S. 89 ff.) der genannten Schrift entsprechen stationärem Geschehen und sind also hier beweiskräftig.

[3]) Die vor Belichtung vorhandene elektromotorische Kraft des sogenannten Ruhestromes wurde jedesmal kompensiert.

[4]) Potentialsprünge, die gar nicht von der Erregung abhängen, sind im voraus kompensiert. Vgl. übrigens die ähnlich gerichteten Bemerkungen von de Haas selbst, a. a. O. S. 76.

Messungsresultat hängt also stets außer von der Ionenkonzentration im erregten Gebiete noch von dem Zustande der angrenzenden Bereiche ab; das ist zwar eigentlich nicht besonders zu erwähnen, da es sich von selbst versteht, aber nicht immer wird es wohl hinreichend beachtet. Wenn trotz dieser Abhängigkeit die elektromotorische Kraft in einer größeren Intensitätszone als einfache Funktion der Lichtstärke erscheint, so läßt sich hieraus schließen, daß bei einer Konzentration c im erregten Gebiete die resultierende elektromotorische Kraft in angenäherter Form wiedergegeben werden kann durch:

$$E = \text{const. } ln\, c + \delta,$$

wo δ eine Funktion ist, welche von den Konzentrationen (und Wanderungsgeschwindigkeiten) der angrenzenden Gebiete abhängt, welche stets geringe Beträge hat und welche deshalb bei zunehmender Erregung (wachsendem c) bald gegen den ersten Summanden verschwindet; man kann sich unschwer Kombinationen von elektromotorischen Kräften denken, für welche der angegebene Ausdruck eine Näherungsformel bedeutet. Diese Annahme ergibt das Versuchsresultat von de Haas, sobald in der betreffenden Intensitätszone c der Lichtstärke proportional ansteigt; zugleich folgt das Webersche Gesetz für die Unterschiedsschwelle. Daß besonders bei geringen Lichtstärken das logarithmische Gesetz nicht mehr gilt, ist schon hiernach verständlich; doch hat diese Abweichung noch andere, sogleich zu erwähnende Gründe.

220. Bemerkung über die Elektrophysiologie des Auges. Die elektromotorischen Kräfte des Auges werden in der Regel bestimmt aus Strömen, welche das Auge bei Belichtung durch ein Galvanometer schickt. Diese Strömung ist also das unmittelbar Beobachtete, und es liegt nahe, dem Versuch vor allem Aufklärung über sie zu entnehmen. Man könnte daran denken, auf diese Weise die Frage nach dem speziellen physikalischen Charakter des gestalteten Geschehens zu entscheiden oder wenigstens festzustellen, ob die Strömung, die vom Auge in die Sehbahnen tritt, stationären Charakter im gewöhnlichen Sinne hat oder ob sie oszilliert. Das Einthovensche Saitengalvanometer würde ja den im Nervensystem allenfalls zu erwartenden Frequenzen schnell genug folgen. Wäre die Überlegung richtig, so hieße die Antwort: die optische Strömung bei gleichmäßig andauerndem Lichtreiz ist quasistationärer elektrischer Strom; denn einen solchen registriert das Galvanometer[1]). Ich meine jedoch, daß galvanometrische Registrierung in einem Stromkreise, in welchem Auge und Galvanometer einfach hintereinanderliegen, die Frage leider nicht entscheiden kann. Das Auge ist keine Maschine, die ein für allemal eine bestimmte Funktion auf feste Art verrichtet, sondern ein physikalisches (und chemisches) System, welches je nach den Bedingungen die oder jene Erscheinung aufweisen wird.

[1]) Eine neuere Untersuchung an den Augen von Mollusken, in welcher der quasistationären Verschiebung Wellen superponiert gefunden wurden, ist mir zurzeit nicht zugänglich.

Zu diesen Bedingungen gehört aber während der Registrierung das Galvanometer selbst (vgl. hier 52 ff.), das ja den elektromotorischen Kräften des Auges eine Strombahn von relativ geringem Widerstande (für organische Verhältnisse) liefert. Daß dabei ein stationärer elektrischer Strom registriert wird, ist von vornherein zu erwarten, beweist aber durchaus nicht, daß eine ähnliche Strömung unter normalen Umständen durch die Sehbahnen (und die Retina) geht. Denn das Geschehen in diesem Falle hängt eben überall (auch in der Retina) von den Leitungsbedingungen der Sehbahn durchweg und besonders der grauen Felder ab, und deshalb können wir über die Form der optischen Strömung nichts Sicheres aussagen, ehe wir versucht haben, die elektrische Registrierung anstatt durch Ableitung von zwei Bulbusstellen unter Einschluß der Sehrinde vorzunehmen. Das Galvanometer muß bei Untersuchung dieser Frage ein relativ unbedeutender Teil des durchströmten Systems sein, und in dieses müssen die wesentlichen Teile der natürlichen Strömungsbahn eingeschlossen werden, wenn sich eine klare Entscheidung über die normal-physiologische Funktionsart ergeben soll. Sollte die elektrische Verschiebung während der Belichtung des Auges auch in der Sehrinde nicht oszillieren, dann würde es allerdings wahrscheinlich, daß die normale Strömungsart quasistationären Charakter hat.

Falls die optische Strömung an Unstetigkeitsflächen chemische Reaktionen unterhält, so kann, wie eben nicht näher auseinanderzusetzen ist, schon hieraus ein Anlaß zu oszillatorischen Verschiebungen werden. Wenn man das Auge exstirpiert, aber auch schon, wenn man es in situ durch das Galvanometer kurz schließt, fällt dieser Anlaß fort.

Der Wert von experimentellen Untersuchungen, welche am peripheren Auge die elektromotorischen Kräfte als solche aus den entstehenden Strömen bestimmen, wird durch den eben besprochenen Umstand natürlich in keiner Weise herabgesetzt. Nur darf man meiner Meinung nach so nicht feststellen wollen, ob das optische System auf Belichtung des Auges an und für sich „rhythmisch reagiert“ oder nicht.

221. Die physikalische Theorie des Weberschen Gesetzes bedarf mehrerer Zusätze.

a) Bisher wurde vorausgesetzt, die Elektrolyte der benachbarten ungleich erregten Feldbereiche ständen in unmittelbarer osmotischer Verbindung. Selbst wenn es sich um zwei Regionen handelt, die wirklich eine gemeinsame Kontur bilden, braucht diese Voraussetzung nicht zuzutreffen (vgl. oben 15), es könnten vielmehr zwischen histologischen Elementarteilen des Feldes, in welchen das Licht die stationären Reaktionen unterhält, unbeteiligte Elektrolyte oder halbdurchlässige Membranen liegen. Im homogen erregten oder ganz unerregten Felde würden aus Symmetriegründen die Bedingungen hiervon nicht geändert werden; an der gemeinsamen Kontur ungleich erregter Regionen aber bestände dann statt eines Potentialsprunges die Summe von zweien. Aus der Nernstschen „Theorie des elektrischen Reizes“ würden sich Gesichtspunkte für eine Durchführung dieses Gedankens ergeben; mir ist jedoch gegenwärtig ein Teil der maßgebenden Literatur

nicht zugänglich. Überdies zeigt ja die Erfahrung, daß die etwa vorzunehmende Korrektur in einem mittleren Intensitätsbereiche keine praktische Bedeutung haben kann (vgl. auch die Bemerkung in 219).

b) Die psychologische Beobachtung zeigt, daß der Eindruck eines Farbenzueinanders und ebenso, daß die Unterschiedsschwelle für tonfreie Farben in stärkstem Maße von dem Abstand der Teilfelder abhängt. Ein Paar tonfreie Papiere, die bei Berührung im Gesichtsfeld als weit „übermerklich verschieden" wirken, werden mit einiger Unsicherheit beurteilt, machen nicht mehr den Eindruck eines „entschiedenen Zueinanders", wenn sie zwar noch simultan, aber durch größere Flächen einer dritten Färbung getrennt gesehen werden. Es gibt kein phänomenales Farbenzueinander, welches, von allen sonstigen Faktoren unbeeinflußt, nur „das Verhältnis der beiden Farben zueinander" so wiedergäbe, wie das die Ansicht der Intellektualisten zu sein scheint. In der Nähe der Schwelle z. B. „ist es von großer Bedeutung, ob die zu vergleichenden Felder sich unmittelbar berühren; nicht nur ein größerer Abstand erschwert die Vergleichung, sondern schon das Vorhandensein einer nur sehr feinen Trennungslinie"[1]). Diese Beobachtung stimmt durchaus zu den Erwartungen, die sich aus der physikalischen Theorie unter Berücksichtigung der Verhältnisse im Organismus ergeben. Übrigens aber gewinnen Faktoren wie aktives Zusammenfassen, Aufmerksamkeit usw. eine entscheidende Bedeutung, sobald es sich um irgendwelche Farbenzueinander über einen Abstand hin handelt: Es ist gar nicht von vornherein sicher, daß in der Struktur des betreffenden Feldes bei passiver Betrachtung physiologisch oder phänomenal solche Farbenzueinander wirklich immer schon vorhanden sind, ich habe vielmehr den Eindruck, daß sie bei entsprechendem Interesse erst ausgebildet werden, in Umbildung der „natürlichen" Struktur. Solche Fälle können wir hier noch nicht behandeln.

c) Daß das Webersche Gesetz für tonfreie Farben nicht bei beliebigen Extremwerten der Strahlung gelten kann, ist nach der Theorie leicht verständlich. In ihr wurde angenommen, daß im stationären Zustande der tonfreien retinalen Reaktionen die Ionenkonzentrationen der Strahlungsintensität proportional sind, und soviel diese Voraussetzung sonst für sich hat, ist sie doch sicherlich nicht zutreffend bei allergrößten und noch viel weniger in einem weiten Gebiet von schwachen Intensitäten. In jenem Fall erwartet man von vornherein, allmählich an eine Grenze der chemischen Leistungsfähigkeit der Retina zu kommen, wenn der Substanzverbrauch pro Sekunde in einer Richtung immer mehr erhöht wird; für den zweiten Fall genügt es daran zu erinnern, daß die Retina beim Übergang zu schwacher Belichtung ein ganz verändertes chemisches System wird, wie die direkte und die elektrophysiologische Beobachtung übereinstimmend lehren und die Theorien seit geraumer Zeit zu erklären suchen. Daß in der Sinnesfläche, die bei Adaptation eine andere geworden ist und sich mit dauernd geringer Beanspruchung lange weiter ändert, dieselbe Abhängigkeit der Reaktionen von den Strahlungen fortlaufend weiterbestehen sollte wie bei mittleren Intensitäten, erscheint als ganz unmöglich, und so kann man Proportionalität von Strahlung und Ionenkonzentration nur innerhalb eines mittleren, vielleicht etwas nach großen Helligkeiten hin liegenden Bereiches erwarten, in welchem einerseits die Retina ihre chemische Natur nicht wesentlich ändert und andererseits die Anforderungen der Strahlung sozusagen noch erfüllbar sind. Das wäre dann der Bereich, für den das Webersche Gesetz in Beziehung auf die Reizintensitäten gilt. Wir haben es aber ursprünglich

[1]) von Kries in Nagels Handb. d. Physiol. III, 1, 250.

auf die Ionenkonzentrationen bezogen, und diesen gegenüber kann es weit über jene Gültigkeitszone hinaus zutreffen, ohne daß wir, die wir ja nur die Reize und nicht die Konzentrationen messen, uns hiervon zu überzeugen vermöchten. Andere Ursachen, welche Abweichungen veranlassen können, sind unter a) und oben 219 angeführt.

222. Da Versuche über das Webersche Gesetz feststellen, wann zuerst das Phänomen eines Farbenzueinanders, eines Sich-Absetzens in der farbigen Felderfüllung auftritt, oder umgekehrt, wann es gerade eben verschwindet, so muß eine Theorie des Gesetzes wenigstens ihren Anfang bei denjenigen Prozessen nehmen, welche mit jenem Phänomen zu tun haben. Wie die erlebten Farbinhalte oder Qualitäten mit den Lichtintensitäten zusammenhängen, ist eine zweite und schwerer zu beantwortende Frage, die wir bisher kaum gestreift haben[1]). Die Vorstellungsweise Fechners hat also mit dieser Theorie nichts zu tun. Hier kommen keine „Empfindungsdifferentiale" vor, und die von Nernst entlehnte mathematische Ableitung bezieht sich genau wie die ursprüngliche Rechnung dieses Physikers auf durchweg physische Größen in Flüssigkeitsketten. Das logarithmische Gesetz behält jedoch seine Form auch jenseits des Schwellenwertes bei, und man kann mit Recht fragen, welche Bedeutung es etwa dann für die Farbphänomene und Farbenzueinander haben mag; aber jedenfalls bestimmt es auch dann nicht „Empfindungsstärken", sondern stets physische Größen von der Dimension [Arbeit] : [Einheit der Elektrizitätsmenge], also z. B. Volt. Sobald die Schwelle überschritten ist, wird unserer Auffassung nach der Potentialsprung mitbestimmend für den Verlauf der Strömung und für chemische Reaktionen, welche diese an Unstetigkeitsflächen unterhält[2]); doch die gesetzmäßige Beziehung zwischen Lichtstärken (oder retinalen Konzentrationen) und Potentialsprung braucht nicht einfach in eine entsprechende Beziehung zwischen den Lichtstärken (retinalen Konzentrationen) und der Strömung, erst recht also nicht zwischen Lichtstärken und psychophysischen Farbprozessen überzugehen. Die erste Folgerung, die sich für das Geschehen jenseits der Schwelle ergibt, ist überdies gar nicht auf einen Zusammenhang zwischen lokaler Lichtstärke (der retinalen Abbildung) und „zugehöriger" tonfreier Farbe gerichtet, sondern besagt ganz im Gegenteil, daß ein eindeutiger Zusammenhang dieser Art gar nicht besteht, daß vielmehr wie der Potentialsprung (unter und über der Schwelle) auch die Strömung selbst und ihre zentrale chemische Wirkung im allgemeinen Funktion der retinalen Reaktionen (Lichtstärken)

[1]) Die übliche Behandlung des Weberschen Gesetzes geht gerade umgekehrt vor.

[2]) Vgl. oben 202.

ringsum ebensogut sind wie der retinalen Reaktion (der Lichtstärke) in dem sogenannten „zugehörigen" Retinateil. Manche Erscheinungen, die dem entsprechen, sind ja so auffällig, daß z. B. in Theorien des Kontrastes schon seit geraumer Zeit das optische System als eines von durchgehendem Geschehenszusammenhang anerkannt wurde. Aber man entschloß sich zu diesem Gedanken, als solle nur eben eine Anomalie erklärt werden, und ließ die übrige theoretische Behandlung optischer Erscheinungen ganz so, als handle es sich um einzelne selbständige Empfindungsprozesse. Selbst in der Farbentheorie sind übrigens die Kontrasterscheinungen im engeren Sinne wohl kaum die stärksten und wichtigsten, welche zu unserem Prinzip Beziehung haben.

Die eigentliche Theorie der psychophysischen Farbprozesse, ihrer Abhängigkeit von der Strömung (und den Potentialsprüngen) kann ohne genaue Kenntnis der Strömungsart nicht gegeben werden (202).

223. Das Webersche Gesetz hat man nicht allein für tonfreie Farben — für diese übrigens auch im Tierexperiment —, sondern ebenso für die Unterschiedsschwellen auf einer Anzahl anderer Gebiete gültig gefunden, und wo sich im Versuch nur eine Annäherung an jene Gesetzmäßigkeit ergibt, liegt immerhin die Vermutung nahe, daß die relativ äußerliche Prüfung und Formulierung in Abhängigkeit von den Reizen (anstatt Konzentrationen) am Entstehen der Abweichungen beteiligt ist. Nicht immer braucht es sich dabei um elektromotorische Kräfte zu handeln, welche einen Mindestwert erreichen müßten, ehe ein bestimmtes Geschehen einsetzen könnte. Ausdrücke von der Form const. $\log \frac{c_2}{c_1}$ treten allgemeiner als Maß isothermer reversibler Arbeitsleistung an verdünnten Lösungen auf, wenn dabei nur eine Molekülart ihre Konzentration ändert. Der Grund liegt in den mathematischen Eigenschaften der einfachen Zustandsgleichung von Mariotte-Boyle-van 't Hoff

$$p = cRT,$$

auf deren Form ja das Webersche Gesetz auch für den Fall des Potentialsprunges in letzter Linie zurückgeht (vgl. oben die Theorie von Nernst, 208).

Viertes Kapitel.

Die Bedingungen psychophysischer Raumstruktur.

224. Das leitende System beginnt mit der Netzhaut. Bleiben die sogenannten zentralen Faktoren konstant, von welchen gestaltetes Geschehen beeinflußt werden kann, so variiert in diesem System die bedingende Topographie (Formenmannigfaltigkeit) unmittelbar

mit der jeweiligen Reizkonfiguration. In diese sind die jeweiligen Bedingungen der optischen Projektion (auf die Retina) einzurechnen; aber auch davon abgesehen veranlaßt nicht jede Änderung der Reizart ein Variieren der entsprechenden Strömungsgestalt als Raumstruktur.

I.

225. Wir kehren zu dem einfachsten Beispiel zurück und denken uns einen einfarbigen, etwa weißen Kreis auf homogenem grauen Grund gegeben. Der Blick sei fixiert, und damit die retinalen Farbreaktionen, also auch ihre Trennungskurve an feste Bereiche gebunden. Es bildet sich eine bestimmte Struktur des Geschehens durch den ganzen optischen Sektor aus, welche wir vorläufig nur durch ihr phänomenales Korrelat kennen. Wenn wir jetzt die Farben von „Figur" und „Grund" (Kreis und Umgebung) in der Reizgeometrie vertauschen, werden damit die retinalen Reaktionen ebenfalls vertauscht. Die Folge wird eine Richtungsumkehr der elektrischen Vektoren sein und sicherlich auch eine Änderung der Substanzart, welche hier und dort in den Sehbahnen verschoben wird. Weil dagegen das leitende System sowie die bedingenden Formen die gleichen geblieben sind wie im ersten Fall, so ist die Raumstruktur des Geschehens dieselbe wie zuvor. [Daß der Energiedichte nach das beschränkte Kreisgebiet in beiden Fällen und unabhängig von der Farbe den Vorrang behält (vgl. 199), ist nur eine Seite dieser allgemeineren Tatsache.] Wenn wir ständig den retinalen Ort, die Größe und die Raumform der Reaktionsgebiete konstant lassen, und anstatt die beiden tonfreien Farben miteinander zu vertauschen, sie einander qualitativ ähnlicher oder unähnlicher machen, so variiert zwar der Betrag der wirksamen Kräfte, welche ein Geschehen gerade dieser Struktur unterhalten, es nimmt überall die Geschehensdichte zu oder ab, und auch das Strömungsmaterial ändert sich; da aber die maßgebenden Formen dieselben und am gleichen Ort bleiben sollen, so haben wir nach den Erfahrungen an physikalischen Gestalten im allgemeinen keine Umbildung der Struktur als solcher zu erwarten (vgl. 40 und 111). Gleiche Orte, gleiche Größen und Formen lassen sich endlich mit irgendwelchen Paaren von Farbreaktionen der bunten Reihen erfüllen; dann wird zwar die Lebhaftigkeit des Geschehens und seine Materialnatur in extremer Weise variieren, aber innerhalb weiter Grenzen nicht die räumliche Ausbreitungsart. Man muß nur beachten, daß außer dem Ort, der Größe und der Form der retinalen Reaktionsgebiete auch das leitende System, in welchem sich die Strömung verbreitet (insbesondere seine grauen Felder), als konstant gehaltener Bedingungskomplex vorausgesetzt wird.

Da es für die Überlegung gleichgültig ist, welche Struktur wirklich entsteht, und da wir sie auf irgendwelche andere Formen als den Kreis ebensogut anwenden könnten, so folgt: Bei gleicher Form, gleicher Größe und gleichem Ort auf der Retina gehört im allgemeinen zu einer abgebildeten Form eine und dieselbe Strömungsgestalt, welche besonderen Farben die Topographie auch haben mag.

Das entspricht der psychologischen Erfahrung und galt in der älteren summativ-geometrischen Auffassung als fast selbstverständlich; da aber dasjenige, welches sich bei wechselnden Farben gleich bleibt, übergeometrische Eigenschaften hat, so ist die summative Deutung auch in dieser Hinsicht unzureichend; sie löst das Problem nicht, sondern sie übersieht es.

Man könnte übrigens daran denken, daß an den Grenzen je zweier chemischer Phasen die Gesetze der Strombrechung zu berücksichtigen wären, und daß deshalb je nach der Materialnatur der aneinandergrenzenden Lösungen (Reaktionsgebiete) verschiedene Strukturen entstehen müßten. Aber der leitende Zusammenhang wird wohl im wesentlichen durch feine Fäden hergestellt; ich glaube nicht, daß es unter solchen Umständen angebracht ist, der Strombrechung merklichen Einfluß beizumessen.

226. In Diskussionen über die Frage, ob sich eine physiologische Theorie des Gedächtnisses ausbilden lasse, wurde es als eine Schwierigkeit angesehen, daß eine Figur bei gleicher geometrischer Form, aber ungleicher Farbe gegenüber der ursprünglichen Darbietung doch nahezu dieselben reproduktiven Wirkungen haben könne, als wäre auch die Farbe die gleiche[1]). Diese Schwierigkeit kann jetzt wohl als beseitigt gelten; denn es ist ja das wesentliche Ergebnis unserer Untersuchung, daß die Struktur oder Ausbreitungsart der Strömung genau so ein physisch reales Datum ist wie ein Farbprozeß, und daß deshalb eine reproduktive Wirkung sich an jene ebensogut (in Wirklichkeit noch besser) anschließen kann wie an diesen Prozeß. Wenn die gleichbleibende Struktur des Geschehens bei Variation der Farbe noch angenähert reproduziert, als wäre auch die Farbe erhalten, so ist das also nicht auffallender, als wenn gleiche Farben bei veränderter Raumgestalt einmal ihre reproduzierende Wirkung behalten. Eine theoretische Verlegenheit besteht wohl nur so lange, als der „Figur" nichts psychophysisch Wirkliches, sondern nur eine Geometrie von Empfindungsprozessen entsprechen soll[2]).

---

[1]) Becher, Gehirn und Seele 1911.

[2]) Die Frage, inwiefern überhaupt im Nervensystem reproduzierende Wirkungen zustande kommen, ist damit nicht einmal gestreift. Ich bestreite nur, daß dergleichen bei Raumstrukturen als „reproduzierendem Moment" irgend rätselhafter sei als bei Farben.

227. Die Regel, daß Raumstrukturen von Farben unabhängig sind, unterliegt gewissen einschränkenden Bestimmungen.

a) Bei der Änderung der Farben dürfen keine neuen bedingenden Formen geschaffen werden. Und zwar bedeutet es ganz neue Strukturbedingungen, wenn ein zunächst homogen gefärbtes Gebiet (z. B. das der „Figur") in zwei oder mehr Teilgebieten verschiedene Farbe erhält; jede neue Inhomogenität oder Kontur stellt eine Veränderung der Formentopographie dar und wird also im allgemeinen von Einfluß auf die Raumgestalt sein. Daß die Charaktere von Phänomen sich sehr stark ändern können, wenn innerhalb einer festen Formengruppierung auf diese Weise neue Inhomogenitäten erzeugt werden, ist bekannt genug; die Ausbildung von „Gestalten" im engeren Sinn, die Einheitlichkeit begrenzter Gesichtsfeldbereiche usw. hängen im stärksten Maße von dergleichen ab, und die Praxis unserer optischen Veranschaulichungsmethoden in der projektiven Geometrie, der Anatomie, der Geographie usw. ist ganz nach diesem Gesichtspunkt geregelt. Für den gegenwärtigen Zustand der Raumpsychologie wirkt viel auffallender und eindringlicher die von Benussi entdeckte Tatsache, daß Einführung neuer Inhomogenitäten in eine sonst unveränderte Reizfigur sogar die phänomenale Ausdehnung von Einzelbereichen beeinflußt, und zwar so, daß die Umbildung deutlich Funktion der neu auftretenden Farbunterschiede ist[1]). Für die summativ-geometrische Auffassung des Gesichtsfeldes oder des entsprechenden physischen Geschehens ist diese Tatsache ganz unverständlich.

b) Wenn der Unterschied der objektiven Farben unter einen Schwellenwert sinkt, geht die betreffende Struktur überhaupt verloren (3. Kap.). Aber selbst oberhalb der Unterschiedsschwelle könnte, solange die Verschiedenheit der Farben noch nicht groß ist, die Struktur mit dem Farbenunterschied (d. i. mit dem Betrag der wirksamen Kräfte) etwas variieren. Es genügt wohl, ein physikalisches Analogon anzuführen: Stellen wir uns ein physikalisches Leitersystem von vielen Stromzweigen vor, in welchen elektrolytische Zellen liegen, so kann sich die Ausbreitungsart bei wachsender elektromotorischer Kraft dadurch ändern, daß Bahnen von hoher polarisatorischer Gegenkraft erst bei hoher elektromotorischer Kraft durchströmt werden, nachdem Wege von geringerer Gegenkraft die Strömung zuerst allein leiteten. Das physikalische Beispiel hat um so mehr Bedeutung, als Polarisierbarkeit eine wesentliche Eigenschaft gerade nervöser Bahnen ist.

---

[1]) Archiv f. d. ges. Psychologie 32, 412 u. — Benussi zeigte dasselbe auch von phänomenalen Richtungen.

II.

228. Eben wurden die Eigenschaften des leitenden Systems als relativ konstant angesehen im Vergleich zu der unübersehbaren Mannigfaltigkeit möglicher retinaler Reizkonfigurationen. Aber selbst wenn diese Konstanz durch gleichmäßiges „inneres Verhalten" (Konstanz der zentralen Faktoren) vollkommen gemacht werden könnte, gehören doch auch die sich gleich bleibenden Leitungseigenschaften des Systems immer zu den Bedingungen, von welchen die Ausbreitungsart des Geschehens abhängt, und bei derselben Reizlage oder Formenkonfiguration retinaler Umsetzungen würde die Raumstruktur der Strömung gänzlich verschieden ausfallen, wenn die konstante Topographie im optischen Sektor eine andere wäre, als sie wirklich ist. Um über sie etwas aussagen zu können, müssen wir die Methode der Überlegung ändern; denn wir sind noch nicht in der Lage, durch morphologische, mikrohistologische oder physiologische Untersuchung eine ausreichende Kenntnis der relativ konstanten Leitungsbedingungen zu gewinnen. Deshalb stellen wir die Frage: Wenn es sich um ein gestaltetes Geschehen im optischen Sektor handelt, welches die allgemeinen Gesetze zusammenhängender physikalischer Strömungen befolgt, wie muß dann das leitende System im wesentlichen beschaffen sein, damit bei bekannter retinaler Konfiguration das Geschehen die phänomenal zu beobachtenden Struktureigenschaften annimmt?

229. Sehr leicht anzustellende Beobachtungen über diese Eigenschaften wollen wir zu Anfang absichtlich etwas ungenau beschreiben, damit Einzelheiten an der phänomenalen Wirklichkeit uns nicht über den Grundcharakter des Untersuchten täuschen. Hinterdrein ist dann die Korrektur vorzunehmen.

a) Als retinal abgebildete Figur werde wieder ein homogen gefärbter Kreis in ebenfalls gleichmäßig gefärbtem Umfeld vorausgesetzt. Wenn sein Ort so auf der Netzhaut gewählt ist, daß die Gestaltwahrnehmung günstigen Bedingungen unterliegt, also nicht auf der Retinaperipherie, dann erhalten wir den Eindruck von dem, was eben in der Anschauung „ein Kreis" genannt wird. Verschiebt man die Figur, immer indem dabei die Retinaperipherie vermieden wird, so ändert zwar das phänomenale Feld im ganzen seinen Charakter je nach der besonderen Lage des Kreises, aber die phänomenale „Gestalt" (im engeren Sinne), die gesehene „Figur", bleibt dieselbe und wechselt nur ihren phänomenalen Ort. Prüfen wir eine andere Form als den Kreis, so ergibt die Beobachtung das gleiche, sofern die retinale Form bei ihrer Verschiebung nur einen Ortswechsel, aber keine Drehung durchmacht und der Netz-

hautperipherie ferngehalten wird; die „Gestalt“ ändert sich dabei nicht irgend wesentlich.

b) Vergrößert oder verkleinert man die retinale Ausdehnung des abgebildeten Kreises oder einer anderen Figur, aber unter Erhaltung der Proportionen, also der Form im prägnanten Sinn[1]), so bleibt die Raumgestalt als solche erhalten, es ändert sich nur ihre phänomenale Ausdehnung („Sehgröße“) und im allgemeinen die Eindringlichkeit oder Lebhaftigkeit ihres phänomenalen Daseins.

c) Je markanter und einfacher die Figur ist, desto schärfer lassen sich diese beiden Unabhängigkeiten (vom retinalen Ort und vom absoluten Maßstab) kontrollieren, und deshalb wird die Sicherheit der Beobachtung am größten gerade beim Kreis, welcher durch seine Gestaltsymmetrie ein ganz ausgezeichnetes phänomenales Gebilde ist. Eine kleine Verzerrung dieser Strukturregelmäßigkeit bei Orts- oder Maßstabänderung würde uns schon auffallen. Eben die Gestaltsymmetrie des Kreises ist aber auch an und für sich eine Tatsache, welche der Unabhängigkeit von Ort und Größe an Bedeutung für unsere Frage nicht nachsteht. Der im geometrischen Sinn vollkommenen Symmetrie der retinalen Kreisform entspricht in der Wahrnehmung phänomenale Gleichmäßigkeit der „Gestalt“ ringsum, in jeder Richtung oder wie man sagen will. Andere geometrische Formen von weniger vollkommenen Symmetrieeigenschaften (Ellipse usw.) ergeben Gestalten von deutlicher phänomenaler (also übergeometrischer) Symmetrie zum wenigsten dann, wenn ihre Symmetrieachse (eine dieser Achsen, wo geometrisch mehrere vorhanden sind) in vertikaler Lage, am besten, wenn sie auf dem mittleren Meridian der Netzhaut abgebildet wird.

Man könnte noch allgemeinere Beobachtungen darüber anschließen, daß vielfach geometrisch ausgezeichneten Fällen von Raumformen ausgezeichnete Fälle von optischen Raumgestalten entsprechen, z. B. der kürzesten Verbindung zweier Punkte (auch bei schräger Abbildung) die „Gerade“ im phänomenalen Sinn und dergleichen; doch lehren solche Beispiele nichts, was nicht schon den angeführten Erfahrungen zu entnehmen wäre.

230. Aus allen drei Beobachtungen läßt sich derselbe Schluß ziehen. Wir beginnen mit der dritten: Die phänomenale Symmetrie des gesehenen Kreises veranlaßt uns, das psychophysische Geschehen im Bereich der „Figur“ für entsprechend symmetrisch zu halten. — Dabei ist aber von vornherein zu bemerken, daß erstens Symmetrie eines physisch-dynamischen (also übergeometrischen) Zusammenhanges etwas anderes, und zwar mehr ist als summativ-geometrische Gruppierung oder Verteilung unabhängiger physischer Elemente in symmetrischer Raumform, und daß zweitens jene physische Zusammenhangssymmetrie

[1]) Vgl. oben 42 und 113.

bestehen kann, auch wenn das Geschehen, einfach auf den Raum bezogen, also nur der Geometrie (oder Anatomie) nach beurteilt und gemessen, sicherlich unsymmetrisch ist. Über den ersten Punkt brauche ich nicht mehr zu sprechen, inwiefern der zweite Fall verwirklicht sein kann, wird ebenfalls leicht klar, wenn man bedenkt, daß es auf eine funktionelle Gleichmäßigkeit dabei ankommt, die an und für sich mit einer geometrischen nicht zusammenzufallen braucht.

231. So sind z. B. zwei Längen oder Abstände für einen physischen Zusammenhang nicht dann gleich, wenn sie beim Abmessen dieselbe Anzahl Zentimeter ergeben, sondern wenn sie für den betreffenden Zustand, das betreffende Geschehen äquivalent wirken. Zwei Drähte von gleichem Querschnitt haben nicht dann gleiche „Widerstandslänge", wenn sie geometrisch dieselbe Länge aufweisen, sondern wenn ihre spezifischen Widerstände sich umgekehrt verhalten wie ihre geometrischen Längen, und nur in dem besonderen Falle gleichen spezifischen Widerstandes beider entspricht ihre geometrische ihrer „Widerstandslänge". — Bilden beide Drähte nebeneinandergeschaltet eine einfache Stromverzweigung, so ist das Geschehen in der Verzweigung bei verschiedenem spezifischen Widerstand beider nicht dann symmetrisch, wenn die Drähte geometrisch gleich lang sind, sondern wenn eben ihre Längen im umgekehrten Verhältnis ihrer spezifischen Widerstände stehen usw.

Der Begriff der „Widerstandslänge" rührt, soviel ich weiß, von Ohm her und ist nur die spezielle Anwendung eines sehr allgemeinen Gedankens, ohne welchen man die Eigenschaften psychophysischer Raumgestalten unmöglich verstehen kann. Noch ein Beispiel: Die funktionelle Ausdehnung eines Strömungsquerschnittes (etwa an einer Unstetigkeitsfläche) ist kein geometrischer Flächenbetrag und jedenfalls nicht identisch mit dem geometrischen Areal, welches die Strömung im ganzen durchquert; zwei Strömungsquerschnitte können funktionell gleich groß und dabei können die durchquerten Areale anatomisch-geometrisch recht verschiedenen Betrages sein. — Man vergleiche hier auch die Ausführungen von 203, sowie in kurzer Form die gleiche Grundanschauung bei Wertheimer, Sehen von Bewegung, S. 88, Anm. 1.

232. Die phänomenale Symmetrie entspricht der geometrischen Symmetrie des objektiv gesehenen (und auf der Retina abgebildeten) Kreises. Geometrisch gänzlich unregelmäßige Reizfiguren pflegen durchaus nicht phänomenale Symmetrie zu geben, und wenn wir also keine prästabilierte Harmonie zwischen den Reizformen und den Eigenschaften unserer Wahrnehmungen annehmen wollen, so müssen wir schließen, daß die geometrische Symmetrie der retinalen Reizform übergeometrisch-physische Symmetrie des von ihr abhängigen gestalteten Geschehens in psychophysischem Niveau bedingt[1]). — Das ist eine direkte Erklärung. Zu der Zeit, als in der Psychologie eine jede Erscheinung womöglich

[1]) Eine Erhaltung der rein geometrischen Reizformsymmetrie in Übertragung durch selbständig leitende Elementarsysteme muß als ganz unmöglich gelten. Vgl. G. E. Müller, a. a. O. **10**, 11 f.

indirekt abgeleitet wurde, hätte man wahrscheinlich versucht, die Symmetrie unserer Kreisanschauung auf eine kinematische Symmetrie von Augenbewegungen bei Betrachtung des Kreises oder Ähnliches zurückzuführen. Da gegenwärtig solche Hypothesen glücklicherweise schon recht gering eingeschätzt werden, brauche ich mich nicht eigens gegen sie zu wenden. Nun müssen wir aber irgend eine Verbindung zwischen der geometrischen Reizsymmetrie und der Symmetrie der Gestaltwahrnehmung herstellen, und als direkte Erklärung kommt nur die eben gegebene in Betracht. — Das psychophysische Geschehen im Fall einer symmetrischen Gestaltwahrnehmung soll also nicht etwa nur deshalb entsprechende übergeometrische Symmetrieeigenschaften haben, weil unsere Grundanschauung (vgl. 180) allgemein Ähnlichkeit von optisch-phänomenaler Gestalt und gestaltetem Geschehen im optisch-somatischen Feld als möglich erweist und als gegeben voraussetzt, sondern umgekehrt: weil die übergeometrischen Symmetrieeigenschaften der Gestaltwahrnehmung in Zuordnung zu der geometrischen Symmetrie der Reizform sonst nicht zu verstehen sind, müssen wir dem psychophysischen Vorgang, welcher allein der Vermittler dieser einfachen Zuordnung sein kann, entsprechende dynamisch-funktionelle Symmetrie zuschreiben und finden freilich auf diesem Wege und in diesem besonderen Fall abermals, daß phänomenale und psychophysische Gestalten einander ähnlich sind [1]).

Was vom Kreise gilt, bleibt für jeden anderen Fall richtig, in welchem einer geometrischen Symmetrie der Reizkonfiguration eine entsprechende Symmetrie der wahrgenommenen „Gestalt" (im engeren Sinn) zugeordnet ist. Soweit dies wirklich beobachtet wird, muß auch das psychophysische Geschehen im betreffenden Bereich die nur geometrische Symmetrie der Reizkonfiguration in zugehörige Symmetrie des real-physischen Geschehenszusammenhanges sozusagen übersetzt enthalten, so daß dann der phäno-

[1]) Ich wiederhole, daß es sicher nicht statthaft ist, das Anwendungsgebiet dieses Satzes auf das Geschehen im optischen Sektor zu beschränken. Sobald man sich von der Möglichkeit und Realität physischer Gestalten überzeugt hat, werden ganz allgemeine Erörterungen neuerer Philosophen über den psychophysischen Parallelismus, über „die genaue Zuordnung von Gehirnvorgängen und Bewußtseinszuständen bei vollkommener Unvergleichbarkeit beider" ohne weiteres gegenstandslos (vgl. die Schriften von Sigwart, Liebmann, Busse, Heymans, Schwarz usw.). Der Parallelismus in seiner gewöhnlichen Form und seine Gegner sind sich über die Voraussetzung jener Unvergleichbarkeit in den meisten Fällen einig; aber so sinnlos ist die Welt gar nicht, und weit höhere Phänomene als die ruhenden Gesichtsfelder können durch ihre Gestalteigenschaften somatischen Geschehensstrukturen sachlich und in jedem Fall spezifisch verwandt sein (vgl. auch 179, wo es sich um die fundamentale Möglichkeit einer Verwandtschaft nach „Einheit in Struktur" handelt).

menale Feldbereich in dieser Hinsicht wieder die übergeometrische Symmetrie des entsprechenden somatischen Zustandes abbildet. Wollen wir konsequent sein, so müssen wir endlich weiter folgern: Wo einer geometrischen Symmetrie der Reizkonfiguration eine Symmetrie der Wahrnehmung nicht entspricht, da kann auch das psychophysische Geschehen in der betreffenden Hinsicht nicht symmetrisch gestaltet sein. Diesen wichtigen Schluß aber lassen wir zunächst unbeachtet und tun so, als beobachteten wir stets den Symmetrien der Reizformen entsprechende übergeometrische Symmetrien der Gestaltwahrnehmung, und dieser (zu allgemeinen) Voraussetzung gemäß überlegen wir weiter.

233. Die retinale Reizkonfiguration erweist sich als „entscheidend" nicht allein insofern, als das leitende System, abgesehen eben von den retinalen Formen, einen relativ konstanten Bedingungskomplex darstellt, die Netzhauttopographie ist auch entscheidend darin, daß die in ihr vorhandenen Symmetrieeigenschaften entsprechende Geschehenssymmetrien der gestalteten Strömung bis zu psychophysisch maßgebendem Niveau hinauf bedingen und daß also die (konstanten) Leitungsbedingungen im übrigen System diese Symmetrieeigenschaften nicht aufheben. — Daraus ergibt sich die Frage: Unter welchen Umständen bestimmen die Symmetrien von bedingenden Formen eines Systemgebietes entsprechende Gestaltsymmetrie des stationären Geschehens oder Zustandes im ganzen System? — Die Antwort entnehmen wir einfachen physikalischen Beispielen.

234. Einem metallenen Leiter von Kugelform wird eine elektrische Ladung zugeführt. Die Struktur von Ladung und Feld gibt die geometrischen Symmetrieeigenschaften der Kugel in physisch-realer Zustandssymmetrie nur dann wieder, wenn der übrige Gestaltbereich, d. i. der umgebende Raum, entweder homogen ist, selbst keine weiteren bedingenden Formen enthält, oder aber sich für den „Kraftfluß" wie homogen verhält. Das erstere ist der Fall, wenn dieser Raum z. B. Vakuum oder wenn er überall mit dem gleichen Dielektrikum erfüllt ist; die zweite Möglichkeit ist verwirklicht, wenn um die geladene Kugel konzentrische Kugelschalen nacheinander verschiedener Dielektrika liegen; denn diese symmetrische Wiederholung der bedingenden Form im umgebenden Raum kann die Struktur nicht verzerren [1]). Sobald aber in irgend einer Richtung von der Kugelmitte aus nicht genau die gleichen Material-

[1]) Diese zweite Möglichkeit bleibt nachher in der psychophysischen Anwendung außer Betracht, da es sich um einen Fall handelt, der im Nervensystem gewiß nicht für jede der unzähligen denkbaren Formen realisiert sein kann.

eigenschaften anzutreffen sind wie in einer anderen Richtung, nimmt die elektrostatische Struktur nicht mehr die Symmetrieeigenschaften der Kugel an. — Für andere Symmetrien als die der Kugel gilt mutatis mutandis das gleiche.

Ein langer leitender Zylinder von kreisförmigem Querschnitt wird in seinem mittleren Gebiet (fern von den Elektroden) homogen durchströmt, das Geschehen bildet die Symmetrie der Form ab, sofern das leitende Medium im Zylinder keine Inhomogenitäten enthält oder sich für die Strömung wie homogen verhält. Denkt man sich das Zylinderinnere aus beliebig geformten Stücken von Substanzen verschiedener Leitfähigkeit zusammengesetzt, so fällt die Struktur unsymmetrisch aus, obwohl der Zylindermantel seine Symmetrie behält.

Dieselbe Bedingung muß bei periodisch-stationärem Geschehen erfüllt sein. Eine eben ausgespannte Membran innerhalb einer kreisförmigen Randkurve gibt die Symmetrie des Kreises in der Struktur ihres Schwingungszustandes nur so lange wieder, als sie selbst keine weiteren bedingenden Formen enthält oder als sie für den Schwingungsvorgang homogen ist. Setzt sich die Membran aus mehreren Bereichen von ungleichen elastischen Eigenschaften zusammen, so wird im allgemeinen die Struktursymmetrie des Schwingungsfeldes zerstört.

Man sieht, daß es sich um ein allgemeines Gesetz handelt, welches auch aus den physikalischen Betrachtungen der früheren Abschnitte schon hätte entnommen werden können. Denn eine beliebige Inhomogenität im Gestaltraum bedeutet eben eine neue hinzukommende Form, und da die Struktur sich nach der gesamten Formentopographie ausbildet, so wird eine solche weitere Form dem Zustand oder dem Geschehen die Symmetrieeigenschaften nehmen, welche eine allein vorhandene symmetrische Formbedingung der Struktur aufgeprägt hätte.

235. Für den Fall des Kreises im optischen System folgt hieraus: Da das psychophysische Geschehen, welches der „Figur“ entspricht, die geometrischen Symmetrieeigenschaften der retinalen bedingenden Form in Struktursymmetrie übersetzt, so verhält sich das leitende System wie homogen oder „wie formenfrei“ für die optische Gestaltströmung. Offenbar muß jede Abweichung der Systemeigenschaften von dieser Regel eine beträchtliche Bedeutung für unser Sehen haben. Die Erhaltung anderer Symmetrien als gerade derjenigen des Kreises erklärt sich auf dieselbe Weise; wenn das leitende System den retinalen Bedingungen keine weiteren Formen hinzufügt, muß irgend eine Symmetrie der retinalen Form in entsprechende funktionelle Symmetrie der gestalteten Strömung übergehen, aber auch nur bei jener Voraussetzung.

236. Wendet man sich nun den Beobachtungen a) und b) zu, so zeigt sich, daß aus ihnen ganz dieselbe Natur des leitenden Systems zu erschließen ist. Unter welchen Umständen ist auf physikalischem Gebiet Verlagerung einer bedingenden Form als ganzer ohne Einfluß auf die Raumstruktur? — Verschieben wir einen geladenen Leiter, in dessen Umgebung weitere Formen, nämlich Inhomogenitäten des Dielektrikums gegeben sind, so wird die elektrostatische Struktur bei diesem Ortswechsel eine andere, verhält sich dagegen die Umgebung für den Kraftfluß (die Feldausbreitung) homogen, so tritt keine Verzerrung ein. Denn die bedingende Topographie ist durch die Proportionen aller Formmasse anzugeben, und diese Proportionen werden bei Verschiebung des Leiters gegenüber dem inhomogenen Dielektrikum zum Teil geändert. Ähnliche Beispiele für andere Gestaltarten sind leicht zu finden. Nun können wir innerhalb recht weiter Grenzen eine einzelne retinale Figur verschieben, ohne daß die wahrgenommene „Gestalt" (im engeren Sinn) dabei ihre Struktur wesentlich änderte; also bedeutet diese Ortsänderung auf der Netzhaut keine Verschiebung gegenüber weiteren bedingenden Formen im leitenden System, welche von (merklichem) Einfluß auf die Struktur in dem Figurbereich wären; das System verhält sich wie homogen für das gestaltete Geschehen.

237. Daß man die bedingende Form bei Erhaltung der Proportionen vergrößern oder verkleinern kann, ohne die Struktur dadurch zu beeinflussen, wissen wir bereits aus der Untersuchung physikalischer Raumgestalten. Aber Voraussetzung ist dabei wieder Homogenität des Gestaltmediums im übrigen. Denn ist ein Leiter des elektrischen Stromes z. B. in seinem Innern beliebig aus Stücken verschiedenen Materials und verschiedener Leitfähigkeit zusammengesetzt, und schneidet man jetzt von außen Schichten des Leiters derart fort, daß seine begrenzende Form den Proportionen nach dieselbe bleibt, so ist die Struktur im verkleinerten Leiter doch eine andere als zuvor. Sie würde sich nur dann unverändert erhalten, wenn alle im Leiter vorhandenen Formen (Inhomogenitäten) im gleichen Maß verkleinert würden, wenn also alle Proportionen erhalten blieben. Da nun im optischen System Vergrößerung oder Verkleinerung der retinalen Figur bei übrigens konstanten Systemeigenschaften die Struktur der gesehenen „Gestalt" nicht verzerrt, so ist der optische Sektor an und für sich als formfrei und wie homogen für die Strömung anzusehen.

Im leitenden System beliebig lokalisierte und gerichtete Kräfte (außer denen der jeweiligen Netzhautkonfiguration) würden die Symmetrie der „Gestalten", ihre Unabhängigkeit vom retinalen Ort und von dem absoluten Maßstab ebenso stören wie weitere bedingende Formen. Treten derartige

Störungen also nicht auf, so enthält das leitende System an sich keine Kräfte, oder aber vorhandene Kräfte sind wie homogen durch den optischen Sektor verteilt, derart, daß sie keine Struktur verzerren.

238. Diese Überlegungen sind ganz von den drei vorausgesetzten psychologischen Befunden abhängig. Die Erfahrung aber weist in Wirklichkeit so einfach-ideale Verhältnisse nicht auf, das leitende System ist sicherlich nicht vollkommen homogen für die Strömung, und seine Eigenschaften kommen der Homogenität nur so nahe, daß sie und damit die Natur unseres Sehens am besten als Abweichungen von dem Idealfall beschrieben und verstanden werden.

Diejenigen Erfahrungen, welche den optischen Sektor des Nervensystems als nicht wirklich homogen für das gestaltete Geschehen erkennen lassen, zerfallen in zwei Gruppen. Einmal würde man bei sehr genauer quantitativer Durchprüfung des Gesichtsfeldes wahrscheinlich eine ganze Anzahl geringer und unregelmäßiger „Störungen" der Wahrnehmung finden, derart, daß z. B. überall die Symmetrie einer Reizfigur nicht ganz genau in Symmetrie der Wahrnehmung wiederkehrt. Die praktische Bedeutung solcher Erscheinungen — einige von ihnen sind wohlbekannt — ist recht gering. Ihr theoretischer Wert liegt in folgendem: Bei dem Bild, welches die Mikrohistologie vom optischen System gibt, kann man sich physikalisch wohl klar machen, wieso es als nahezu homogen in funktioneller Hinsicht zu wirken vermag, dagegen wäre es unverständlich, wenn die Gleichmäßigkeit der Leitungsbedingungen in idealem Maß erfüllt sein sollte.

239. Ungleich wichtiger sind die starken und deshalb auffälligen Abweichungen:

α) Figuren, die auf der Retina seitlich verschoben werden, ergeben mit zunehmend peripherer Lage sich steigernde Verzerrungen gegenüber der Gestaltwahrnehmung bei fovealer Abbildung; zugleich werden die Gestalten allmählich „verschwommen". Das ist zum Teil von dem Bau der Sinnesfläche bedingt, welche in diesen seitlichen Bereichen (ganz abgesehen von dioptrischen Gründen) die äußere Reizkonfiguration nicht mehr in einer ähnlichen und scharfen Topographie von photochemischen Reaktionen wiedergibt. Indessen besteht reichlich Anlaß zu der Vermutung, daß außerdem auch das leitende System an dem geringeren Wert der peripheren Gestaltwahrnehmung beteiligt ist; diejenigen seiner Gebiete, um welche es sich hier handelt, dürften sich ihren funktionell wichtigen Eigenschaften nach beträchtlich von den mittleren Bereichen unterscheiden.

Das Verschwommenwerden von Gestalten und Verzerrung von Strukturen (welche ja auch bei erhaltener Klarheit vorkommen kann) sind zwei verschiedene Erscheinungen. In der ersten Hinsicht unterscheiden sich Fovea und Peripherie viel auffallender als in der zweiten.

β) Das Gesichtsfeld ist in einer sehr übersichtlichen, in sich wieder einfachen Art inhomogen dadurch, daß es (unter normalen Wahrnehmungsbedingungen) für den erwachsenen Menschen ein recht festes „Oben“ und „Unten“, eine Vertikale, eine Horizontale, ein Links und Rechts besitzt [1]). Selbst der Kreis im phänomenalen Felde erhält auf diese Weise eine gewisse Ungleichmäßigkeit oder Abweichung gegenüber der Symmetrie des Reizkomplexes; denn dieser widerspricht es im Grunde, daß an der „Gestalt“ z. B. eine Seite als „unten“ erscheint. Die Eigenschaften des optischen Systems bleiben dabei immer noch sehr klar und geordnet, weil es sich um eine Inhomogenität im ganzen handelt; im Gesichtsfeld (dem optischen Sektor) durchweg bleiben die „absoluten Koordinatenrichtungen“ ungefähr dieselben. Daher kommt es, daß bloße Ortsänderung einer retinalen Figur den Gestalteindruck so wenig ändert, während eine Drehung, welche die Form gegenüber jenen Richtungen verschiebt, die Wahrnehmung stark zu beeinflussen pflegt. Es liegt also eine einfache „Anisotropie“ des ganzen Systems vor. Diese Erscheinung ist von der größten praktischen Bedeutung deshalb, weil die Gravitation, von welcher die gesehenen Dinge und unser Körper fortwährend in ihrem physischen Verhalten bestimmt werden, ungefähr die entsprechenden Richtungen zu objektiv ausgezeichneten an der Erdoberfläche macht. Das theoretische Interesse an den absoluten Richtungen im leitenden System wird dadurch eher gesteigert als abgeschwächt, daß sie sich erst im Verlauf des individuellen Lebens auszubilden scheinen und durch zeitweilige Veränderung der Wahrnehmungsumstände beeinflußbar bleiben.

Die physische Ursache der Anisotropie kann entweder in den Leitungsbedingungen des Systems als solchen liegen oder aber in konstant vorhandenen Kräften des optischen Sektors, welche bestimmte (funktionelle) Richtungen im Geschehen auszeichnen. In beiden Fällen muß der bedingende physische Umstand die gleiche Regelmäßigkeit durch das System hin aufweisen, wie die beobachtete Anisotropie selbst.

Wenn in Zukunft von „Homogenität des leitenden Systems“ die Rede ist, soll dieser Ausdruck stets Gleichmäßigkeit der leitenden Bedingungen mit den bekannten und einfachen Abweichungen bedeuten.

240. Es verdient ausdrücklich hervorgehoben zu werden, daß der Schluß auf Homogenität der (relativ) konstanten Systembedingungen in keiner Weise von den Vorstellungen abhängt, welche wir uns von der Materialnatur der psychophysischen Geschehensstrukturen und den in ihnen wirksamen Kräften machen.

[1]) Vgl. Stumpf, Zur Einteilung der Wissenschaften (Berliner Akademieberichte 1906), S. 72.

Von entsprechenden Beobachtungen wie oben (a, b, c) wäre überall in der Physik (wie ja z. B. in der Elektrostatik, Strömungslehre und Elastizitätsmechanik) die gleiche Folgerung zu ziehen. Und deshalb kann man es entweder ganz unterlassen, die optischen Phänomene als Äußerungen psychophysischer Gestalten verstehen zu wollen, oder aber, wenn man diese Aufgabe — einerlei auf welche spezielle Art — überhaupt angreift, dann muß man den optischen Sektor notwendig als homogen voraussetzen.

241. Und doch scheint das auf den ersten Blick eine merkwürdige Annahme; denn das leitende System ist gewiß nicht in jedem Sinne homogen, etwa so homogen, wie wir uns den geometrischen Raum denken, sondern hat eine sehr deutliche „Zusammensetzung" im Mikroskopischen. In der Naturwissenschaft bedeutet jedoch das Wort „homogen" zweierlei, je nachdem ob es die Natur eines Mediums bis in beliebig kleine Raumelemente angeben, oder die („makroskopische") Gleichmäßigkeit der Systembereiche gegenüber einem Geschehen, einem Zustand im Großen bezeichnen soll. Wahrscheinlich ist kein physisches Medium (vom elektromagnetischen Raum oder Vakuum vielleicht abgesehen) homogen im ersten Sinn, und deshalb hat als ungleich wichtigere Bedeutung des Ausdrucks die zweite zu gelten. Sie ist auch diejenige, welche wir hier in physikalischen wie in anatomisch-physiologischen Anwendungen meinen: Das optische System verhält sich wie homogen für seine Funktionen (die in ihm verlaufenden Strömungen), insofern und soweit die Leitungsbedingungen von einer gewissen Größenordnung an nicht mit den Orten und den (in Betracht kommenden) Richtungen der Felder variieren. Daß dagegen für die histologische Betrachtung im Kleinen Homogenität ganz gewiß nicht besteht, ist so lange und so weit ohne Interesse für die eben erörterte Frage, als die mikroskopische Inhomogenität des Gewebes (Zusammensetzung aus ungleichartigen Elementargebilden) durch die Felder hin sich gleich (oder nach statistischen Gesetzen angenähert gleich) bleibt, überall gleichmäßig wiederkehrt und eben damit Homogenität im etwas Größeren schafft[1]). Erst wenn die Natur (die Elementarformen) jedes beliebig kleinen Bestandteiles des leitenden Systems für die Geschehensstrukturen als solche und für die phänomenalen Gestalten unmittelbare Bedeutung hätte, bestände hier etwas wie eine Schwierigkeit. Das leitende System ist also ein Netzwerk, und zwar ohne Zweifel ein Netzwerk aus nicht

[1]) Ähnlich kehrt in einer „homogenen Membran" die gleiche (oder statistisch angenähert gleiche) „Inhomogenität im Kleinsten" überall wieder, und für jede Betrachtung der elastischen Membranschwingungen kann deshalb die Haut als „homogen im etwas Größeren" gelten.

gleichartigen Elementarteilen, aber dieses Gewebe muß im etwas Größeren überall (mit den angegebenen Einschränkungen) gleichartige Bedingungen für die Strömung bieten.

242. Auch auf solche Art verstanden, bleibt die Homogenität des optischen Sektors für seine Funktionen eine Tatsache, die nach weiterer Erklärung verlangt. Wie kommt es, daß — vom Aufbau im Kleinsten abgesehen und also im Durchschnitt für etwas größere Gebiete — das Netzwerk sich relativ[1]) gleichmäßig entwickelt und auswächst? Hier stoßen wir zum ersten Male auf eine entwicklungsgeschichtliche Frage. Es liegt nahe, sie ebenso wie die Frage nach den Grundfunktionen des Nervensystems nicht in der Weise älterer Hypothesen zu beantworten, sondern mit Rücksicht darauf, welches die allgemeinsten Eigenschaften von Geschehen und Verschiebungen in einem physischen System bei gegebenen Bedingungen sind. Das ist der Weg zur allgemeinen Biologie, für welche das Verständnis der Grundeigenschaften von physischen Gestalten gewiß nicht mindere Bedeutung hat als für das psychologische Gebiet, deren Probleme aber eben mit Einschluß des genannten beiseite bleiben müssen[2]).

243. Die „Homogenität im etwas Größeren" darf wieder nicht auf den anatomisch-geometrischen Raum als solchen bezogen werden; es kommt auf den „Funktionsraum" an. Ist z. B. — und schematisch gesprochen — die Querverbindung zwischen zwei Sehrindengebieten (etwa durch die Querkommissuren des Balkens hindurch) mehrere Zentimeter, die zwischen zwei anderen Gebieten (einer Sehrinde) einen Millimeter lang, so können jene und diese Gebiete doch funktionell gleichen Abstand haben, wenn für den Abfall eines Potentials, die Ausbreitung eines physischen Einflusses jene Kommissuren dieser Verbindung äquivalent sind.

In den letzten Sätzen (vgl. auch oben 231) liegt bereits eine quantitative Definition des Funktionsraumes, welcher für die psychophysischen Gestalten allein unmittelbare Bedeutung hat und als entscheidend in dieser Hinsicht zuerst von Wertheimer[3]) erkannt wurde. Weil in der bisherigen physikalischen Gestalttheorie die funktionellen Ausmaße zumeist mit den geometrischen Dimensionen der betreffenden Medien zur Deckung kommen, wird leicht übersehen, daß die rein physikalischen Strukturen primär ebenfalls auf den Funktionsraum zu beziehen sind.

244. Die ältere Problemstellung über den Zusammenhang der Retina mit zentral-somatischen Feldern ist, wie bereits hervor-

[1]) Die oben 238 erwähnten Beobachtungen werden hier theoretisch einmal von Interesse; die Gleichmäßigkeit dürfte statistischer Natur sein.

[2]) Ich verweise vorläufig nur kurz auf die Untersuchungen von C. U. A. Kappers über „Neurobiotaxis" (seit 1907), deren Grundrichtung mit derjenigen dieser Schrift recht verwandt ist.

[3]) Sehen von Bewegung, S. 88, Anm. 1.

gehoben wurde, von Grund aus anders orientiert. Wenn man sich die optische Wahrnehmung einer Figur, eines Dinges aus rein summativen und geometrischen Gesichtspunkten physiologisch verständlich machen will, also von physischen Gestalten gänzlich absieht, dann ist die erste Sorge naturgemäß die, der Sehrinde noch etwas wie ein geometrisches Abbild der retinalen Formen zukommen zu lassen. Denn wenn nicht einmal dies der Fall wäre, wie soll dann die additive Gesamtheit der „Empfindungen" z. B. bei einem Kreis durch Summation (bloße Undverbindung) etwas von einem Kreis und seiner Symmetrie ergeben? Es ist bei solcher Fragestellung nur konsequent, in einer Projektion der Retina auf die Sehrinde, und zwar notwendig Flächenelement für Flächenelement, die Lösung des heiklen Problemes zu suchen [1]). So hat sich die Anschauung entwickelt, daß jedem Retinaelement ein Sehrindenelement in unveränderlicher Punktentsprechung zugehöre, daß diese Zugehörigkeit ein für allemal anatomisch festgelegt sei und deshalb zentral jedesmal eine feste geometrische Gruppe voneinander unabhängiger Erregungen eine bestimmte gleichartige Gruppe von Erregungspunkten auf der Retina abbilde (vgl. oben 160 ff.). Man mag so mechanistischen Vorstellungen im Grunde herzlich abgeneigt sein; es ist bei summativem Denken in der Physiologie kaum um sie herumzukommen.

Bei der Unvereinbarkeit der Ausgangspunkte für diese Gedankenbildung auf der einen und für die Auffassung des optischen Sektors als *eines* physischen Systems auf der anderen Seite wäre jede polemische Erörterung müßig [2]). Wir leisten mehr, wenn wir den Gegensatz so konkret und anschaulich wie möglich machen, und das in der Entwicklung der folgenden Konsequenz:

Selbst wer aus wahrlich guten Gründen *nicht* annimmt, daß elementare und selbständige Lokalerregungen in der Sehrinde zusammen eine geometrisch *ähnliche* Projektion der entsprechenden retinalen Bilder darstellen, pflegt doch an der Voraussetzung festzuhalten, erstens daß die zentralen Lokalerregungen (selbständige) *Teile* des ganzen zentralen Vorganges sind, und zweitens (aber

---

[1]) Allenfalls könnte man, wie das früher ja auch geschah, jeder „Empfindung" einen physiologischen Index ihres retinal-geometrischen Herkommens als „Lokalzeichen" angeheftet denken, mit dessen Hilfe dann die Seele eine Rekonstruktion vorzunehmen hätte. Diese letztere muß nicht leicht sein. — Die Gestalttheorie kennt keine Lokalzeichen und bedarf ihrer nicht. Jedes Moment einer physischen oder psychophysischen Struktur ist durch seinen übergeometrisch-dynamischen Zusammenhang mit den übrigen und deshalb mit der ganzen Gestalt *in dieser* vollkommen und *real* lokalisiert.

[2]) Übrigens brauche ich ja kaum zu erwähnen, daß das eigentliche Problem selbst durch *ähnliche* Retinaprojektion durchaus nicht gelöst wird (vgl. oben 166, Anm.).

in theoretischem Zusammenhang mit [dem ersten Punkt), daß bestimmten retinalen Elementen durch anatomische Leitungsvorrichtung ein für allemal ganz bestimmte Sehrindenelemente zugehören, in welchen also die zugehörigen „Empfindungsprozesse" entstehen. Die Gestalttheorie leugnet nicht etwa nur, daß lokales Geschehen in Sehrindenelementen selbständig sei, ebensowenig ist ihr Sinn damit hinreichend klar gekennzeichnet, daß ja im Prinzip von den retinalen Formen im ganzen alle Momente, das ganze Geschehen in zentralen Gebieten abhängen, also deshalb schon gar keine rechte „Punktzuordnung" im gewöhnlichen Sinne besteht: In der Theorie physischer Raumgestalten geht ein Stromfaden[1]), welcher auf bestimmten Retinaelementen beginnt, durchaus nicht notwendig und immer zu ein für allemal bestimmten Sehrindenstellen, für die Gestalttheorie besteht „Freizügigkeit der Stromfäden" innerhalb des homogenen Leitungssystems, und auch, wo einer von ihnen in zentrale Felder mündet, bestimmt sich in jedem Falle nach den gesamten Systembedingungen. Das ist keine neue Annahme über die zugrunde liegende physikalische Auffassung hinaus, sondern eine einfache Folgerung aus ihr, die man nur mit der Grundlage zusammen annehmen oder ablehnen kann. Im Gegensatz zu der herrschenden Auffassung wirkt sie zuerst befremdend, mit der Erfahrung aber kommt sie nirgends in Widerspruch[2]).

Sie ist dagegen in offenbarem Widerspruch zu der im ersten Abschnitt noch vorausgesetzten festen, punktmäßigen Zuordnung von Sinnesfläche und zentralerem Feld durch verbindende Leitung (2), also eben zu der alten Denkweise. Ich habe schon dort angedeutet, daß diese konservative Annahme nur anfangs und um der leichteren Einführung willen gemacht wurde. Man erkennt jetzt, daß für die Ableitung elektromotorischer Kräfte in somatischen Feldern dergleichen statthaft, ja vor Klärung des Begriffes physischer Gestalten einfach erforderlich war, und daß erst bei Behandlung der Gestaltströmungen nach Annahme II (185 ff.) der Unterschied zwischen der alten und der neuen Anschauung von entscheidender Bedeutung wird.

III.

245. Verschieben wir auf der Retina eine Figur nach der Peripherie hin, und werden die natürlicherweise hierauf einsetzenden

[1]) Die physikalische Bedeutung dieses Wortes ist wohl geläufig.

[2]) Es ist eine Frage für sich, in welchem Maße die Stromfäden wirklich ihre Verlaufswege ändern. Die vorkommenden Verschiebungen scheinen bei stationärem Geschehen (phänomenal ruhenden Gestalten) nicht sehr bedeutend zu sein und erst in gewissen dynamischen Verläufen größer zu werden. Darauf kann ich hier noch nicht näher eingehen. Diejenigen experimentell-physiologischen und pathologischen Erfahrungen, welche zur Hypothese einer absolut festen Retinaprojektion geführt haben, sind jedenfalls ihrer Natur nach gar nicht dazu geeignet, eine so extreme Annahme zu begründen.

Augenbewegungen verhindert, so geht mit der Klarheit und der bestimmten Struktur der ursprünglichen Gestaltwahrnehmung nicht einfach alles verloren, was bei fovealem Sehen zum Charakter der Gestalt gehörte. Sie erscheint nun als relativ diffus und mitunter erheblich verzerrt, aber sie gehört phänomenal noch immer zu der gleichen Kategorie der Raumgestalten überhaupt. Auch auf physischem Gebiete kann bei einer Modifikation der in Betracht kommenden funktionellen Systemeigenschaften (und welches immer diese Änderung beim Übergang von der Fovea zur Peripherie sein mag) nicht plötzlich eine ganz andere Prozeßart auftreten, sondern die Strömungen ändern nur ihre Verlaufsart mehr oder weniger, bleiben aber an und für sich vom gleichen Geschehenstypus.

Die allgemeinen Grundlagen der Theorie, wie sie von der Physik übernommen werden, enthalten nichts von Voraussetzungen, welche gerade nur in einem optischen System zutreffend sein könnten. Es sind andere Felder möglich, in denen der Prozeßart nach durchaus Gleiches geschieht wie in der Sehrinde, wennschon sie dem leitenden Material nach von dieser einigermaßen abweichen, chemisch etwas anders konstituiert sein und vielleicht als leitende Systeme die (wertvollen) Eigenschaften nicht ganz haben mögen, die den wichtigsten Gebieten der optischen Felder zukommen. Wenn also den Sinnesflächen des Tastsinnes zentrale somatische Felder ähnlich zugehören wie der Retina z. B. die Sehrinde, so müssen in solchen Gebieten Strömungen ganz entsprechenden Ursprungs (d. h. unterhalten von elektrischen und osmotischen Vektoren) auch der allgemeinen Art nach gleichartige Strukturen annehmen[1]). Handelt es sich um andere Ionen oder um andere Kolloide, die in der Strömung verschoben werden, so macht das natürlich eine Änderung der chemischen Reaktionen aus, welche an Unstetigkeitsflächen verlaufen, aber keine Änderung der Geschehensart als solcher; denn schon auf optischem wie auf rein physikalischem Gebiete kann das qualitativ mannigfaltigste Material in der Art nach oder auch gänzlich gleichartigen Strömungsgestalten auftreten. Dem Typus nach sind also von der physikalischen Theorie aus taktile Gestaltwahrnehmungen als ebenso primäre und echte Raumgestalten möglich wie optische. Es bedarf nicht assoziationstheoretischer Konstruktionen, durch welche z. B. taktile Gestalten aus optischen irgendwie abgeleitet werden müßten. Ebensowenig zwingt die Übereinstimmung in allgemeinen Gestalteigenschaften bei wesentlicher Verschiedenheit der Qualitäten (im engeren Sinne) zur Annahme einer übersinnlich-intellektuellen

[1]) Vgl. Stumpf, Erscheinungen und psychische Funktionen (Berliner Akademieberichte 1906), S. 13.

Tätigkeit („Produktion"), welche mit den ungleichen „Empfindungen" der beiden Gebiete doch auf gleiche Art zu schalten vermöchte. Nur eben, nachdem man künstlich als den primären Bestand phänomenaler Felder selbständige und deshalb an sich jeder Struktur entbehrende Empfindungen angesetzt hat, ergibt sich ein Problem und aus ihm wieder die Notwendigkeit besonderer hypothetischer Hilfsprozesse, wenn in zwei solchen Feldern die Qualitäten als verschieden, die Gestalten aber als nahe verwandt erscheinen.

246. Die periphere Sinnesfläche wie die zugehörigen zentralen Felder des Tastsinnes sind wohl durchweg etwas minderwertig in demselben Sinne, wie stark außen gelegene optische Gebiete den fovealen an funktioneller Leistungsfähigkeit nachstehen; denn mit unbewegter Körperoberfläche gefühlte Gestalten werden stets diffus wahrgenommen, verschwimmen stark schon bei geringen Komplizierungsgraden der bedingenden Formen (auf die Haut aufgesetzten Figuren) und verzerren sich leicht beim Versuch des Transponierens. Das leitende System hat nicht in dem Maße als homogen zu gelten wie größere optische Gebiete, es muß überdies in seinen Eigenschaften die (hier noch nicht zu erörternde) Ursache des „Gestaltverschwimmens" enthalten[1]). Trotzdem lassen sich mit Hilfe relativ grober Formen Prüfungen der taktilen Gestaltwahrnehmung anstellen, die auch im einzelnen vielfach Übereinstimmung mit den Gesetzen des Gestaltsehens ergeben. Es ist ja durchaus nicht selbstverständlich, daß z. B. zwei simultan der Haut aufgesetzte Zirkelspitzen eine Gestaltwahrnehmung ergeben, welche entschieden phänomenale Strukturverwandtschaft hat zu dem optischen Eindruck bei Darbietung zweier Punkte oder Kreise in sonst gleichmäßig ausgefülltem Gesichtsfelde u. dgl. m. Solange es sich um ganz grobe Formen und geeignete Maßstäbe handelt, gilt wohl der Satz: Gleiche Formen bedingen auf beiden Gebieten einander verwandte (bis ähnliche) Gestalten. Nichts anderes ist nach Gesichtspunkten der physikalischen Theorie zu erwarten[2]).

IV.

247. Eben wurde der Einfachheit wegen kurzweg angenommen, das Material, welches im taktilen Sektor an der Strömung teilnehme, sei ein ganz anderes, als das in optischen Gestalten

[1]) Schließlich könnten andere Gebiete des Nervensystems in dieser Hinsicht noch hinter dem taktilen Sektor zurückstehen, ohne daß doch die betreffenden Phänomene dabei jede Verwandtschaft mit den optischen und taktilen Raumwahrnehmungen verlieren müßten.

[2]) Nicht mehr als ein Spezialfall dieser Verwandtschaft ist es, wenn man gewisse „optische Täuschungen" auf taktilem Gebiete wiederfindet.

wandernde. Eine solche Voraussetzung, die man macht, fast ohne es zu bemerken, geht auf die Verschiedenheit der im engeren Sinne qualitativen Felderfüllung hier und dort zurück; man macht die Hypothese, daß die gestaltet strömende Substanz (Ionen, Kolloide) stets durchweg identisch sei mit dem Material, dessen Reaktionen an Unstetigkeitsflächen jener qualitativen Erfüllung phänomenaler Felder entsprechen. Aber wenn diese Umsetzungen wirklich von dem gestalteten Geschehen unterhalten werden und in ihm liegen, so folgt doch daraus nicht im mindesten, daß alle strömende Substanz Material für sie und im optischen und taktilen Sektor ganz verschieden wäre. Physikalische, physiologische und entwicklungsgeschichtliche Gründe sprechen deutlich gegen diese Voraussetzung, und nur unsere Gewohnheit, das Qualitative (im engeren Sinne) der Felder allein zu beachten und für wichtig zu halten, führt auf sie hin. Gibt es überhaupt Ionen und geladene Kolloide im Nervensystem, die nicht gerade für eine jener Reaktionsarten spezifisch sind, oder solche, die mit keiner dieser Reaktionen überhaupt etwas zu tun haben, so werden solche Substanzen von jedem elektrischen Vektor verschoben, wandern in der psychophysischen Gestalt, und also in Struktur, sei es im optischen, im taktilen oder welchem Sektor sonst. Es gibt solche Substanzen wohl sicher: denn die Ionen des Wasserstoffs, des Natriums und des Chlors z. B. nehmen unseres Wissens an jedem nervösen Geschehen teil und werden deshalb auch in gestalteten Strömungen des taktilen wie des optischen Nervensystems verschoben. Ob dieselben Ionen (neben anderen Komponenten) in die erwähnten „Qualitätsreaktionen“ beider Gebiete eingehen, ist uns zurzeit unbekannt.

Hierauf mache ich nicht aufmerksam, um so die Verwandtschaft der Raumstrukturen verschiedener Sinnesgebiete verständlich zu machen; denn die besteht ja schon ohne jede Rücksicht auf Gleichheit oder Ungleichheit des strömenden Materials, und wird andrerseits durch Gleichheit irgendwelcher wandernden chemischen Substanzen als eigentliche Strukturverwandtschaft gar nicht gesteigert. Es kommt mir nur darauf an, alle physikalischen (oder chemischen) Möglichkeiten zu erwähnen und zu verhüten, daß wir uns durch alte Überschätzung „der Empfindungen“ (und hier ihrer Unterschiede) eine Freiheit der Denkmöglichkeiten beschränken lassen, welche bei rein naturwissenschaftlicher Überlegung offen stehen. Irgend eine Verschiedenheit im Material muß ja vorhanden sein, aber ich bezweifle, daß sie vollständig ist.

248. Und was wird die Folge sein, wenn irgend ein Material (Ionen, Kolloide) in beachtenswerter Konzentration vorhanden ist, welches strömt und in die Gestalten eingeht, aber gar nicht an jenen chemischen Reaktionen teilnimmt, denen wir die phänomenalen Qualitäten (Farben, Tasteindrücke usw.) der Felderfüllung

zuordnen[1])? Gestaltete Strömung, die nicht das Material für Qualitätenprozesse verschiebt, verliert deshalb nicht notwendig die Eigenschaft, psychophysisches Korrelat eines erlebten Gestaltphänomens zu sein, und kann der Art, ja der aktuellen Struktur nach mit denjenigen Gestalten wohl übereinstimmen, welche außerdem auch noch Qualitätenprozesse unterhalten; es fehlt nur eben die Felderfüllung dieser (die Schwarz-, Blau-, Rotprozesse usw.). Gibt es also Anlässe im Nervensystem, welche derartige Strömungen erzeugen, aber nicht zugleich jenes Material verschieben und reagieren lassen, so sind als Korrelate auf phänomenaler Seite Erlebnisse von Raumstrukturen ohne qualitative Felderfüllung, also „reine Raumgestalten", zu erwarten[2]). Derartiges wäre ganz unmöglich in einer Theorie, in welcher sich der erlebte Raum aus selbständigen Elementen der qualitativen Felderfüllung aufbaut oder über ihnen fundiert ist, die physikalische Denkart dagegen läßt „reine Raumgestalten" ebensogut zu wie qualitativ erfüllte, und ob jene wirklich vorkommen, macht sie allein von der Erfahrung abhängig. Was wir allgemein „Vorstellungen von Raumgestalten" nennen, aber vorsichtig nicht ohne weiteres und immer für Reproduktionen früher wahrgenommener Gestalten halten sollten, sind oft genug Strukturen, in welchen sich die qualitative Felderfüllung, wenn überhaupt etwas von ihr vorhanden ist, als ganz unsicheres und schwaches Phänomen nur eben auch andeutet. Kann man den Nullbeweis nicht führen, niemals auf Grund der Selbstbeachtung streng behaupten, daß gar keine qualitative Erfüllung vorhanden war, so stehen doch jedenfalls die möglichen Spuren undeutlicher „Qualitäten" in keinem Verhältnis zu den recht bestimmten funktionellen Leistungen, welche „vorgestellten Raumgestalten" auch unter diesen Umständen noch eigentümlich sein können. Wenn es vorkommt, daß die „gedachte Struktur" als solche deutlich erlebt wird und ihr gemäße präzise Leistungen des Organismus zur Folge hat, aber zugleich gänzlich unklar und verschwommen an Qualitätenspuren auftritt[3]), dann darf man nicht die größte Mühe aufwenden, aus diesen Schemen

---

[1]) Noch einmal: Haben wir den mindesten Anlaß, diese Möglichkeit für unwahrscheinlicher zu halten als die andere, daß nur Material für „Qualitätenprozesse" in der Strömung wandert?

[2]) Diese sind dann zeitunabhängige Gegenstücke zu dem Phänomen „reiner Bewegung" im Sinne Wertheimers (Sehen von Bewegung, S. 61 ff.).

[3]) Beispiel: Man tritt ans Billard und „sieht" zwischen den drei Bällen die Stoßbahn, welche den Spielregeln und der gegebenen Lage der Bälle entspricht. Welche Farbe hat diese Vorstellung? Kann sie bei unbestimmter Farbe sehr bestimmte „Gestalt" und von präziser äußerer Wirkung sein?

Bestimmtheit und Präzision der Gestalt und Gestaltwirkung abzuleiten. Und man braucht es nicht; denn ein dynamisch-realer Zusammenhang, der psychophysisch einer phänomenalen Raumgestalt entspricht, wird mit dem Schwinden irgendwelcher chemischer Reaktionen in seiner Bahn nicht notwendig selbst zunichte.

„Reine Raumgestalten" mögen im optischen und im taktilen Sektor des Nervensystems vorkommen, aber wir sind nicht sicher, daß ihr Auftreten auf diese Gebiete beschränkt bleibt. „Wie in einem Raume", mit Grundeigenschaften von Raumgestalten, scheint ein großer Teil menschlichen Denkens zu verlaufen, auch wo es sich kaum um den Raum optischer Wahrnehmung und in physiologischer Hinsicht nicht wohl um die Sehrinde handeln kann [1]).

Fünftes Kapitel.

Die Richtung auf Prägnanz der Struktur.

249. Wenn man die Ausbreitungsart gestalteten Geschehens noch nicht im einzelnen genau bestimmen kann, wie uns das zurzeit für die psychophysischen Strukturen wirklich unmöglich ist, dann gelingt es doch mitunter, allgemeine Richtungen anzugeben, in denen ihre Ausbildung erfolgen muß. So hat Gauß für harmonische Funktionen, die mathematischen Ausdrücke unzähliger physischer Strukturen, eine Reihe von wichtigen Sätzen abgeleitet, und deren Richtigkeit in jedem Falle ist davon ganz unabhängig, ob uns die Bestimmung der betreffenden harmonischen Funktionen für willkürlich gegebene Bedingungen gelingt oder nicht [2]). Ähnlich versuchen wir jetzt zu ermitteln, in welcher Richtung die Ausbildung zeitunabhängiger psychophysischer Gestalten liegt, wenn schon wir, unbekannt mit der besonderen Natur gerade des nervösen Geschehens, auf die Schärfe und Bündigkeit theoretisch-physikalischer Ableitungen von vornherein verzichten müssen. Wie bisher können jedoch solche Ableitungen wenigstens als Grundlage des Gedankenganges dienen.

250. Jeder zeitunabhängige (statische oder stationäre) Zustand, der sich in der Natur ausbildet, stellt gegenüber einer unendlichen Mannigfaltigkeit von anderen Zuständen einen ausgezeichneten

---

[1]) Die Tatsache hat, wenn ich nicht irre, F. A. Lange zuerst erkannt. Vgl. neuerdings Wertheimer, Zeitschr. f. Physiol. 60, 352 ff.

[2]) Vgl. die Lehrbücher der Potentialtheorie, oder auch Riemann-Weber, z. B. II, S. 261 ff.

Fall dar. Denn wenn für eine gegebene und als unveränderlich vorausgesetzte physische Topographie ein Material[1]) zu Anfang (unserer Betrachtung) eine gewisse Gruppierung und in allen Punkten gewisse Geschwindigkeiten besitzt, und wenn überhaupt nach kurzer oder langer Zeit ein unveränderlicher Zustand erreicht wird, so muß dieser eben deshalb schon vor sämtlichen früheren Phasen durch irgend eine besondere Eigenschaft ausgezeichnet sein, um derentwillen die Veränderung gerade in ihm zum Abschluß kommt. Da bei festen bedingenden Formen von einem bestimmten Anfangszustande zu der entsprechenden zeitunabhängigen Endgruppierung in der Natur nur ein Weg führt, so ist hiermit der zeitunabhängige Zustand ausgezeichnet in einer einfach unendlichen Mannigfaltigkeit oder Reihe von vorausgehenden Zuständen. Im allgemeinen werden aber unendlich verschiedene Anfangszustände bei der gleichen bedingenden Form möglich sein, auch solche, die durchaus nicht Phasen eines und desselben Geschehensweges darstellen; sofern nun der gegebenen Topographie eine ganz bestimmte zeitunabhängige Struktur entspricht[2]), münden die Geschehenswege von allen möglichen Anfangszuständen aus auf diese eine Ausbreitungsart, die also nicht nur vor den dynamischen Phasen sämtlicher Mannigfaltigkeiten, sondern auch dadurch ausgezeichnet ist, daß alle Wege in diesem Endergebnis übereinstimmen.

So hat ein einzelner isolierter Leiter der Elektrizität eine durch seine Form und die Topographie der umgebenden Dielektrika eindeutig bestimmte Eigenstruktur, und diese muß ein ausgezeichnetes Gebilde sein vor allen Phasen eines dynamischen Vorganges, der von einem bestimmten Anfangszustand aus zu der Ruhestruktur überleitet. Von verschiedenen Anfangszuständen aus führen zu der gleichen Eigenstruktur verschiedene dynamische Wege, welche im allgemeinen Falle keine Phase außer diesem Endzustand untereinander gemein haben werden.

251. In der theoretischen Physik wird gezeigt, daß eine auszeichnende Bedingung für alle zeitunabhängigen Strukturen gültig ist: Die Energie einer Gestalt ist Funktion ihrer Raumstruktur. Wie bereits früher erwähnt wurde (vgl. 92), ändert sich die Ausbreitungsart dann nicht mehr, wenn die Energie der Struktur im ganzen so klein geworden ist, wie die gegebene Topographie überhaupt zuläßt. Alle Zustände, welche (einerlei, auf welchem dynamischen Verlaufswege) vor Ausbildung der zeitunabhängigen Struktur

---

[1]) Das Wort steht hier in demselben sehr weiten Sinne wie früher.

[2]) Es gibt Fälle, wo die Topographie nicht eindeutig eine Struktur bedingt; so ist diese für mehrere geladene benachbarte, aber isolierte Leiter noch Funktion der Ladungsbeträge auf den einzelnen. Der Einfachheit wegen bleiben solche Konstellationen hier unerörtert. Auf einem Leiter ist die Struktur unabhängig von der Ladung.

passiert werden, besitzen also im ganzen (bei Summation, Integration über den Strukturbereich hin) größere Energie der betreffenden Art als die Ausbreitung, die sich am Ende ausbildet[1]). Oder auch: In allen Verläufen, welche überhaupt in zeitunabhängige Endzustände ausmünden, verschiebt sich die Ausbreitungsart in Richtung auf ein Minimum der Strukturenergie hin[2]).

Dieser Satz widerspricht durchaus nicht dem Energieprinzip: Während der Verschiebung wird fortwährend Energie der betreffenden Art in andere, für die endgültige Struktur bedeutungslose Energien übergeführt, vor allem in Wärme. Wenn die Strukturenergie möglichst klein und die Ausbreitung zeitunabhängig, dann ist die aus der Struktur abgegebene Energie so groß wie möglich geworden; diese Zunahme ist jener Abnahme genau äquivalent.

Das Gesagte folgt aber auch nicht aus dem ersten Hauptsatz. Denn, wenn schon nur der Ausdruck Energie, nicht z. B. Entropie darin vorkommt, so sagt doch das Energieprinzip an und für sich durchaus nichts darüber aus, daß eine Energieart im Naturgeschehen notwendig kleiner werden müßte zugunsten anderer. Die Richtung abnehmender Strukturenergie kann nur vom zweiten Hauptsatz der Thermodynamik her verstanden werden[3]).

252. Da alle Rechnungen an schwachen Gestalten mit einfacheren mathematischen Hilfsmitteln auszuführen sind, betrachten wir als Beispiel eine schlichte Verzweigung elektrischer Strömung und fragen, bei welcher Art der Stromspaltung die Energie des Geschehens ein Minimum wird. Da in den Zweigen keine elektromotorischen Kräfte liegen sollen, so gibt die überall in der Zeiteinheit entstehende Joulesche Wärme das exakte Maß der Gestaltenergie. Nennen wir also J den Haupt-, J_1 und J_2 die beiden Zweigströme, R_1 und R_2 die entsprechenden Zweigwiderstände, so ist zu bestimmen, wann die gesamte Stromwärme

$$J_1^2 R_1 + J_2^2 R_2 \quad \text{oder} \quad J_1^2 R_1 + (J - J_1)^2 R_2$$

ein Minimum wird, d. h. für welches J_1 der Ausdruck

$$\frac{d}{dJ_1}\left[J_1^2 R_1 + (J - J_1)^2 R_2\right]$$

verschwindet. Das ist der Fall für

$$\frac{J_1}{J - J_1} = \frac{J_1}{J_2} = \frac{R_2}{R_1},$$

---

[1]) Für im engeren Sinne thermodynamisches Geschehen ist dieser Satz nicht immer zur Festlegung von Gleichgewichten genügend; wir lassen solche Fälle beiseite.

[2]) Wo es sich nicht um ein Minimum im streng mathematischen Sinne handelt, ist „kleinster möglicher Wert" zu sagen; doch macht das für uns keinen Unterschied aus.

[3]) Vgl. hier Planck, Thermodynamik (3. Aufl.), § 107 bis 113.

also wenn die Stromspaltung dem Ohmschen Gesetz für stationäre Strömung folgt; diese entspricht wirklich einem Minimum von Gestaltenergie[1]).

Es handelt sich um ein Minimum (kein Maximum); denn die zweite Abgeleitete des angegebenen Energieausdruckes ist immer positiv.

Für komplexere Stromnetze gilt das gleiche; liegen elektromotorische Kräfte im System, so wird nicht einfach die Stromwärme, sondern ein entsprechend veränderter Energieausdruck bei der stationären Ausbreitungsart so klein, wie es die Gestaltbebedingungen überhaupt zulassen[2]).

253. Und wieder ebenso verhalten sich starke Gestalten. Bezeichnet man das Potential mit V, mit $d\tau$ ein Volumelement, so ist, wie wir früher (50, 117) sahen, die Energie im Dielektrikum um einen geladenen Leiter und die Strömungsenergie in einem leitenden Gebiet dem Ausdruck

$$\iiint \left[\left(\frac{\partial V}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial z}\right)^2\right] d\tau$$

proportional. Dabei soll die Integration über den Gesamtraum der Struktur erstreckt werden, das Summierungsergebnis hängt durchaus von der Ausbreitungsart des Zustandes oder Geschehens ab. Für welche Struktur (welch eine Funktion V) das Energieintegral bei vorgeschriebenen Randbedingungen so klein wie möglich wird, bestimmt man mit Hilfe der Variationsrechnung und findet, daß in diesem ausgezeichneten Falle die Struktur der Gleichung $\Delta V = 0$ genügen, daß V eine harmonische Funktion sein muß[3]). Das Energieminimum wird also wirklich bei derjenigen Ausbreitungsart erreicht, welche uns bereits als die aller zeitunabhängigen elektrischen Struktur bekannt ist, und was für diese zutrifft, bleibt für die anderen starken Gestalten in Ruhe oder im stationären Zustande richtig.

254. Hieraus läßt sich eine noch weitergehende Folgerung ziehen: Eine physische Gestalt bedeutet (unter anderem) die Gruppierung gewisser Kräfte, welche im allgemeinen auf die gegebene Form einwirken und sie nur dann nicht wirklich umbilden, wenn die Form als absolut fest betrachtet werden kann. Ein sehr spezieller Fall dieser Art ist es, wenn (vgl. 119 f.) elektrolytisch geleitete Ströme dahin tendieren, die elektrochemischen Eigenschaften der Elektroden zu verändern; vielfach (wie z. B. in der

---

[1]) Vgl. Chwolson, Physik (franz. Ausg.) IV. S. 606.

[2]) Maxwell, Electricity and Magnetism I, S. 408, Anm.

[3]) Vgl. Maxwell, a. a. O. I, S. 136 f., S. 423 f.; Riemann-Weber, a. a. O. II, S. 262 f.

Elektrostatik) greifen die Vektore der Struktur ponderometrisch, wie Zuge oder Drucke, an der eigenen Form an. Denkt man sich die Bedingungen derart gewählt, daß die Form nicht absolut fest ist, sondern der Einwirkung allmählich bis zu einem gewissen Grade nachgeben kann, so wird diese Umbildung der Form zugleich eine Selbstverwandlung der Struktur bedeuten, die sich ja gemäß der Form lagern und also mit dieser ändern muß. Wenn es aber die Kräfte der Gestalt sind, die hierbei Arbeit leisten, z. B. Reibung oder elastischen Widerstand überwinden, so ist es auch die Gestalt, welcher die erforderliche Energie entstammt[1]). Beginnt der Vorgang mit einem stationären (quasistationären) Zustand, in welchem die Struktur (für die ursprüngliche Form) den kleinsten möglichen Energieinhalt hatte, so muß deshalb die Verschiebung der Form und damit die Selbstumbildung der Gestalt in einer Richtung erfolgen, welche noch weiter herabgesetzter Strukturenergie entspricht.

255. Als Beispiel kann ein Elektrolyt dienen, in dem die (metallenen) Elektroden um Punkte oder Achsen drehbar sind, ohne daß diese Bewegung die Stromzuleitung behinderte. Bei beliebiger Anfangsstellung dieser Systemteile wird sich der Strom derart ausbreiten, daß für die ursprüngliche Form die Struktur ein Energieminimum ergibt; denn die Elektroden bewegen sich in der Flüssigkeit mit beträchtlicher Reibung, und so kann sich der stationäre Zustand ausbilden, ehe noch eine merkliche Verschiebung der Metallteile erfolgt. Nun handelt es sich aber im Leiter um Strömungsenergie und elektrostatische Energie, welche beide im Raume auf gleiche Art ausgebreitet sind, und die elektrostatischen Kräfte können sehr wohl bedeutend genug sein, um eine Verschiebung der beweglichen Elektroden zu bewirken. Geschieht dies, so liegt also die Formänderung des Systems in der Richtung einer weiteren Energieabnahme; die Struktur muß ihre Elektroden derart drehen, daß die hierbei neu entstehende Ausbreitungsart einer noch weiter herabgesetzten Strukturenergie, am Ende dem geringsten Energiewert entspricht, welchen die mechanischen Bindungen der Elektroden überhaupt zulassen.

Zur bedingenden Topographie einer elektrischen Ladungs- und Feldstruktur gehören unter anderem Nichtleiter, die sich durch ihre Dielektrizitätskonstante von dem übrigen Feldraum unterscheiden. Man denke sich einen solchen Körper unter starker Reibung beweglich, so greifen die Strukturkräfte der zunächst ent-

[1]) Ist das nicht der Fall, kommt irgend positive Arbeitsleistung von äußeren Kräften (z. B. der Form) in Betracht, so kompliziert sich die Überlegung sehr und kann je nach den betrachteten Umständen recht verschiedene Ergebnisse haben.

stehenden elektrostatischen Gestalt an ihm an und drehen oder verschieben ihn im Sinne einer Form und Gestalt von verminderter potentieller Energie [1]).

Die bedingende Form einer gespannten Membran gibt ihre Randkurve; von ihr umschlossen lagert sich die Membran, wie es im ganzen kleinster elastischer Energie gemäß ist. Sie übt Zugkräfte auf das Material der Randkurve aus und wird, wenn diese deformiert werden kann, dies in der Richtung abnehmender elastischer Gesamtenergie tun.

256. Wir übertragen auf das Nervensystem: Auch zeitunabhängige psychophysische Gestalten nehmen in jedem Falle diejenige Ausbreitungsart an, welche unter den retinalen und sonstigen Bedingungen des jeweiligen Geschehens die kleinste mögliche Strukturenergie im ganzen ergibt. Wir folgern zweitens, daß psychophysische Gestalten, welche auf ihre bedingenden Formen zurückzuwirken und diese umzubilden vermögen, eine solche Verschiebung nicht in beliebigem Sinne vollziehen können, sondern nur derart, daß die damit zugleich eintretende Selbstumbildung der Gestalt in der Richtung einer weiteren Herabsetzung der Strukturenergie erfolgt [2]).

257. Diese Richtung aber erkennen wir nicht ohne weiteres, ebensowenig wie wir es in phänomenaler Beobachtung einer als ruhend erlebten Struktur unmittelbar ansehen können, ob sie gerade einem kleinsten Werte der gesamten Gestaltenergie entspricht oder nicht. Denn die für alle zeitunabhängigen Gestalten gültige Energiebedingung geht ja nicht auf die Ausbreitungsart des Zustandes oder Geschehens als solche, sondern auf eine quantitative Größe, welche mit jener Ausbreitungsart variiert, Funktion von ihr ist. Die Struktur, aber nicht der entsprechende Energiewert (und sein Verhältnis zu anderen) ist uns, auf optischem Gebiet z. B., anschaulich gegeben. Nur wenn uns eine einfache Beziehung zwischen der Gesamtenergie einer Struktur und ihrer Ausbreitungsart als solcher bekannt wäre, könnten wir aus der letzteren, die wir beobachten, einen Schluß auf Erfüllung oder Nichterfüllung des Prinzips kleinster Strukturenergie im Nervensystem ziehen [3]). Ein solcher einfacher Zusammenhang aber scheint

[1]) Vgl. Starke, Experimentelle Elektrizitätslehre (2. Aufl.), S. 77 f., 1910.

[2]) Vgl. jedoch Anm. 1 zu 254. Weitere näher präzisierende Bemerkungen, welche an sich erforderlich wären, lasse ich vorläufig beiseite.

[3]) Die Gesamtenergie hängt außer von der Ausbreitungsart von einem rein quantitativen Koeffizienten (Gesamtstromstärke, Gesamtladung usw.) ab. Soll also die Beziehung nur zwischen Struktur und Energie eindeutig bestimmt werden, so muß man für jenen Koeffizienten ein Normalmaß, etwa 1, wählen und den Zusammenhang sozusagen zwischen der Struktur und ihrer „spezifischen Gesamtenergie“ untersuchen.

bisher nicht einmal im Gebiet anorganischer Gestalten vollkommen klargestellt zu sein. Wie „sehen Gestalten aus“, welche kleinsten möglichen Energiewerten entsprechen?

258. Statt für gegebene Formbedingungen nach einer Beziehung zwischen Gestaltenergie und Ausbreitungsart als solcher zu suchen, könnte man auch von vornherein fragen: Welchen Charakter nimmt die Ausbreitung gestalteten Geschehens in dem ausgezeichneten Falle der Zeitunabhängigkeit an? Muß nicht die zeitunabhängige Struktur, als solche betrachtet, selbst in eindeutiger Weise ausgezeichnet sein vor allen anderen Ausbreitungsarten, die unter Erfüllung der gleichen Formbedingungen denkbar wären? Und auf welche Eigenschaft von Strukturen muß man sich richten, um die eine von ihnen als ein ausgezeichnetes Raumgebilde zu erkennen? Solche Fragen haben wohl dieselbe Berechtigung wie die nach dem Verhalten gerade der Gestaltenergie im ausgezeichneten Zustande, wenn schon es schwer sein könnte, eine ganz allgemeine und strenge Antwort zu geben. Einige wohlbekannte Sätze über harmonische Funktionen nähern sich dem, was wir wissen möchten. Wenn z. B. keine Lösung der Laplaceschen Gleichung (keine harmonische Funktion) in irgend einem Punkte ihres Gebietes Minimal- oder Maximalwerte erreichen kann [1]) (Gauß), so bedeutet dies sicherlich, daß die Ausbreitung der betreffenden Punktfunktion über ihr Gebiet und zwischen den vorgeschriebenen Randwerten hin mit einer gewissen „Einfachheit“ und „Knappheit“ geschieht, vielleicht handelt es sich sogar um irgendwie „maximale Einfachheit und Knappheit“; aber solange wir diesen Ausdruck nicht genauer definieren und von dem Definierten nicht mathematisch nachweisen können, daß es stets und genau der ausgezeichneten Ausbreitung im zeitunabhängigen Zustande (z. B. einer harmonischen Funktion) entspricht, ist die gestellte Aufgabe nicht gelöst.

Es gibt Fälle, wo der Sinn des „maximal einfach oder knapp“ sehr genau anzugeben ist. Wird eine Membran über eine — nur wenig von der Ebene abweichende — Randkurve ringsum gleichmäßig gespannt, so bildet ihre Lagerung im Raume eine ruhende Gestalt, welche der Differentialgleichung

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} = 0$$

genügt, wenn die Membran über der xy-Ebene ausgespannt wurde und V die Ordinate der krummen Oberfläche ist (83). Der Inhalt dieser Fläche wird bestimmt, indem man das Integral

$$\iint \sqrt{1 + \left(\frac{\partial V}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial y}\right)^2}\, dx\, dy$$

[1]) Hier wird nichts über die Energie ausgesagt, die ja gerade bei harmonischer Struktur einen kleinsten Wert erreicht, sondern über den Skalar V.

über die Projektion der Oberfläche auf die xy-Ebene erstreckt. Da mit den Größen V auch ihre Abgeleiteten sehr kleine Größen sind, kann man das Integral einfacher schreiben:

$$\iint dx\,dy + \frac{1}{2}\iint\left[\left(\frac{\partial V}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial y}\right)^2\right] dx\,dy.$$

Hier bedeutet der erste Ausdruck den Flächeninhalt der ebenen Projektion, das zweite Integral ist für eine harmonische Funktion und also im vorliegenden Falle so klein, wie es die Randbedingungen überhaupt zulassen (vgl. oben 253): Die Membran nimmt diejenige Lagerung an, für welche ihr Flächeninhalt so klein wie möglich wird, die „maximale Knappheit" ihrer Ausbreitungsart ist evident. Wenn nicht die Einschränkung beachtet werden müßte, daß V und seine Derivierten sehr kleine Größen sein sollen, so läge eine (bildliche) Übertragung des anschaulichen Ergebnisses auf andere Strukturen nahe genug. Da aber die Anwendbarkeit dieses Extremalprinzips begrenzt ist, so haben wir noch nicht ganz die Gestalteigenschaft getroffen, auf die es überall ankommt[1]).

259. Es gelingt uns also noch nicht, für den Fall der Zeitunabhängigkeit eine allgemein gültige Extremalbedingung abzuleiten, welche die entsprechende Struktur als solche ebenso scharf auszeichnete wie das Minimalprinzip der entsprechenden Strukturenergie einen ausgezeichneten Wert zuordnet. Aber wohl besitzen wir in gewissen Fällen Hinweise darauf, wo die Lösung der Aufgabe zu suchen wäre, und diese Wegzeichen deuten sogar in ungefähr die gleiche Richtung, auf welche das soeben erwähnte Gaußsche Theorem bereits aufmerksam machte.

Da gefragt wird, wodurch sich die wirklich auftretenden zeitunabhängigen Strukturen unter anderen Ausbreitungsarten auszeichnen, betrachten wir Vorgänge und ihr Ausmünden in den zeitunabhängigen Endzustand; denn hierbei kann es am ersten gelingen, durch Vergleich die Extremaleigenschaft der zeitlosen Struktur zu erkennen. Und zwar wählen wir am einfachsten Vorgänge, bei denen die Strukturkräfte, wie oben angegeben wurde, ihre eigenen bedingenden Formen und damit sich selbst umbilden. Die Richtung solcher Verläufe ist ja diejenige, welche wir gerade der Strukturverschiebung nach beurteilen möchten.

Daß dynamisches Geschehen als solches noch nicht auf seine etwaigen Gestalteigenschaften untersucht wurde, macht kein Hindernis für die Betrachtung aus; denn wenn wir nur wissen, daß der schließlich erreichte Endzustand eine zeitlose physische Gestalt ist, und wir deren Struktur mit den Ausbreitungsarten vorher vergleichen können, so brauchen wir dabei nicht notwendig zu entscheiden, ob diese Ausbreitungsarten der dynamischen Vorgeschichte selbst gestalteter Natur sind, und ob etwa der dynamische Verlauf als solcher irgend die Bezeichnung als „Gestalt" verdient oder nicht. Das alles bleibt also vorläufig unerörtert.

---

[1]) Vgl. zum Fall der Membran Riemann-Weber, a. a. O. II, S. 262 ff.

260. Früher (121 f.) war davon die Rede, daß die Struktur der elektrischen Strömung in einem Leiter gegebener Form zugleich die Ausbreitungsart eines Magnetfeldes bestimmt, welches den durchströmten Körper und seine Umgebung erfüllt. Als Leiter werde ein unelastischer zylindrischer Metallfaden gewählt, die elektromotorischen Kräfte seien so in den Faden eingefügt, daß sich an den betreffenden Stellen keine Änderung des Querschnittes und keine störenden elastischen Eigenschaften ergeben[1]). Diesen (isolierten) Faden legen wir in irgend einer willkürlichen und nicht zu einfachen Form (Figur) auf eine horizontale glatte Ebene. Ist die Strömung stark genug, so kann der Faden nach Stromschluß nicht in Ruhe bleiben. Denn durch die Fläche, welche der durchströmte Faden umspannt, treten die Induktionslinien des Magnetfeldes hindurch, und jeder Teil des Leiters unterliegt einer Kraftwirkung, solange durch seine Bewegung die Zahl jener Linien vergrößert wird. Also ändert der Faden seine Figur, bis die gesamte Kontur dem Magnetfelde möglichst weiten Durchtritt gestattet, und da bei gegebenem Umfang die Form größter Fläche der Kreis ist, so muß der Faden bei genügender Stärke von Strom und Feld aus jeder Anfangslage in Kreisform umspringen. Der Leiter, der Stromverlauf und das Feld lagern sich maximal einfach und symmetrisch im Raume[2]).

Betrachtet man gute Magnetfeldbilder, wie die, welche dem Maxwellschen Werke beigegeben sind, so gelingt es oft, nach diesem rein strukturellen Gesichtspunkt vorauszusagen, welche Bewegungen die Stromleiter und Magnete, und welche Umgruppierungen damit die Felder von der gezeichneten Konstellation aus machen werden. Die Umbildung geschieht in Richtung auf gesteigerte Gleichmäßigkeit, Einfachheit, Symmetrie der Felder[3]). (Man vergleiche bei Maxwell die Tafeln 16, 17, 19 und 20, sowie die Bemerkung von Maxwell selbst a. a. O. II, S. 153 f.) Besondere Aufmerksamkeit erfordern labile Gleichgewichte, welche sehr symmetrische, aber nicht so gleichmäßige und einfache Felder zu geben scheinen wie die stabilen Lagen (vgl. die sehr instruktive Fig. 20 bei Maxwell).

---

[1]) Man kann den Versuch auch so entwerfen, daß etwaige technisch-praktische Bedenken fortfallen.

[2]) Chwolson, Physik (franz. Ausg.) IV, S. 588 f., 597, 789.

[3]) Dasselbe besagen ja auch die bekannten Regeln elektrodynamischer Verschiebung, wie z. B.: „Zwei Ströme, die zuerst einen gewissen Winkel miteinander bilden, tendieren dahin, parallel und gleichgerichtet zu werden". (Pellat, Cours d'Électricité II, S. 5.) — Ein sehr gutes Beispiel geben endlich die Gleichgewichtslagen einer größeren Zahl von Magneten um einen Magnetpol entgegengesetzten Zeichens (A. M. Meyer, J. J. Thomson). Vgl. Chwolson, a. a. O. IV, S. 776 f.

261. Ein ganz anderes Beispiel zeigt uns, daß es sich nicht um eine Eigentümlichkeit elektromagnetischer und elektrodynamischer Verläufe, sondern um eine sehr allgemeine Richtung des Naturgeschehens handelt. Stellt man nach van der Mennsbrugghe auf einem ebenen Drahtrahmen ein Seifenhäutchen her und legt auf diesem eine kleine geschlossene Fadenschleife (ohne elastisch stark merkbaren Knoten) in irgend einer Form vorsichtig nieder, so ändert sich zunächst nichts wesentliches an dem Zustande von Haut und Faden; sticht man aber mit einem Stift durch die Seifenhaut im Innern der Schleife, so springt diese Lamelle heraus, und der Faden ist nur noch den Oberflächenkräften des äußeren Häutchens ausgesetzt, welche diesem die kleinstmögliche, also dem freien, vom Faden umfaßten Raum die größtmögliche Fläche zu geben suchen. Der Faden wird augenblicklich zum Kreis[1]). Wo eine physische Form von in sich homogenen Materialeigenschaften den an ihr angreifenden Systemkräften genügend nachgeben kann und schließlich ein Gleichgewicht erreicht wird, scheint also sehr allgemein einfachste und regelmäßigste Raumgruppierung den zeitunabhängigen Endzustand darzustellen. — So würde z. B. auch im oben erwähnten Falle eines Elektrolyten, in den bewegliche Metallelektroden eintauchen, diejenige Lage dieser Teile, welche dem Minimum potentieller Energie und zeitunabhängigem Geschehen entspricht, sicherlich eine ausgezeichnet einfache und regelmäßige Feld- und Strömungsausbreitung bedeuten.

Allereinfachste Erfahrungen der Alltagsphysik zeigen schon dasselbe. Ein elastischer Faden, dessen Enden in etwas größerem Abstande als seiner natürlichen Länge befestigt sind, kann durch Kräfte, die an verschiedenen Stellen seines Verlaufes angreifen, in die verschiedensten Formen gebracht, z. B. durch feste Stifte seitlich ausgebogen werden. Sobald eine dieser Zusatzbedingungen den elastischen Kräften des Fadens nachgibt, geht dieser (durch gedämpfte Schwingungen hindurch) in eine einfachere Form und bei Fortfall alles solchen Zwanges (außer der Fixierung der Enden) in die einfachste mögliche, die gerade Form über. Bei dieser ist dann auch die elastische Energie (und die Fadenlänge) ein Minimum. Für gespannte Membranen gilt mutatis mutandis das gleiche.

262. Es versteht sich, daß dieses Verhalten physischer Systeme bei Abnahme der Systemenergie und Annäherung an Gleichgewichte oder stationäre Zustände den Physikern nicht entgangen ist. Man findet mehrfach angedeutet, daß die Richtung solcher Verläufe und das Auszeichnende statischer und stationärer Systemlagen ebensowohl für die Struktur oder Ausbreitungsart unmittelbar als solche wie für die entsprechende Energie der Systeme müßte formuliert werden können. Von der Kristallographie her haben zuerst W. Voigt und P. Curie darauf hingewiesen, daß Symmetriearten für die

[1]) Vgl. Mach, Mechanik (franz. Ausg.), S. 367.

verschiedenen Naturprozesse eine entscheidende Bedeutung haben. Wenn schon man nicht verkennen darf, daß diese Untersuchungen zunächst einen anderen Weg verfolgten, nicht auf die Gruppierung in beliebigen Einzelfällen gerichtet waren[1]), so findet man doch bei P. Curie Sätze, welche den hier behandelten Fragen nahekommen: Für das Zustandekommen eines Naturvorganges „ist es notwendig, daß gewisse Symmetrieelemente nicht bestehen. Die Asymmetrie schafft den Naturgang“[2]). Also, könnte man hinzufügen, gehen in einem System, das „sich selbst überlassen“ ist[3]), und deshalb einem zeitunabhängigen Zustande näherkommt, Asymmetrien verloren, und das Gebilde wird mit Annäherung an den Endzustand regelmäßiger. Für einfache Bedingungen ist der Sinn des Curieschen Satzes nicht zweifelhaft. Aber wie soll man ihn anwenden, wo — wie bei starken, kontinuierlich ausgebreiteten Gestalten mit irgend komplex geformter Topographie — selbst im zeitunabhängigen Zustande keine „Symmetrie“ im gewöhnlichen Wortsinne erreicht wird? Ich weiß nicht, ob Curie an einen so ausgedehnten Gebrauch seiner These gedacht hat.

Wird er versucht, so stehen wir wieder vor dem oben aufgestellten allgemeinen Problem, eine scharfe, allgemeine und dabei direkte Charakteristik der „Einfachheit“, der „Knappheit“ oder „Regelmäßigkeit“ einer Struktur als solcher zu finden, so daß Symmetrien (im gewöhnlichen Sinne) Extremfälle nach dem gleichen Kriterium werden. Es ist schon nicht selbstverständlich und könnte auch verkehrt sein, daß dabei „Einfachheit“, „Regelmäßigkeit“ u. dgl. wie äquivalente, freilich auch in gleicher Weise vorläufig unscharfe Begriffe auftreten.

263. Bei Mach[4]) heißt es: „Die Gleichgewichtsfiguren, welche Plateau erhielt, indem er in Seifenwasser polyedrische Stützen aus Eisendraht tauchte, bilden Systeme flüssiger Häute von einer wunderbaren Symmetrie. Man wird so auf die Frage geführt, weshalb das Gleichgewicht im allgemeinen eng an Symmetrie und Regelmäßigkeit gebunden auftritt“. Die hierauf folgende Erklärung wendet das Prinzip der virtuellen Verrückungen an und zeigt, daß Symmetrien eines Systems diesem jedesmal Möglichkeiten der Arbeitsleistung nehmen, so daß man wohl verstehen kann, weshalb vielfach symmetrische Systemgruppierungen und Minima arbeitsfähiger Energie, weshalb also auch Symmetrien und zeitunabhängige Zustände so oft zusammen erreicht werden. Wenn Mach jedoch fortfährt: „Die Regelmäßigkeit ist eine vielfache Symmetrie“, so

---

[1]) Wenigstens nicht, soweit die mir zur Verfügung stehende Literatur ein Urteil erlaubt.

[2]) Chwolson, a. a. O. V, S. 27.

[3]) Über die wahre Bedeutung dieses Ausdruckes ist Planck, Thermodynamik, § 140, Anm., nachzulesen.

[4]) Mechanik (franz. Ausg.), S. 374 f.

kann ich in diesem Satze keine vollkommene Lösung des Problems erkennen. Denn werden anstatt recht einfacher Fälle zeitunabhängige Zustände unter irgendwelchen Bedingungen (bei beliebig vorgeschriebener Topographie) betrachtet, so leuchtet mir nicht ohne weiteres ein, inwiefern da auf klare Art die freilich vorhandene und auszeichnende „Regelmäßigkeit", auf welche es anzukommen scheint, als „multiple Symmetrie" aufzufassen ist. Eher möchte man umgekehrt sagen, daß jene „Regelmäßigkeit" in den einfachsten Fällen zu symmetrischer Ausbreitung wird, daß also für die allgemeine Fragestellung jener Begriff, in seiner noch unbekannten scharfen Definition, als der primäre anzusehen wäre.

Andrerseits wird gerade durch die Überlegung Machs noch einmal deutlich, daß es wohl einen solchen allgemeinen Maßstab für das „natürliche" Verhalten der Strukturen (als solcher) geben muß. Deren Veränderungsrichtung (und deren Ausbreitungsart im Endzustande) kann nicht gewissermaßen plötzlich, erst bei allereinfachsten Bedingungen, in angebbarer Weise festgelegt (ausgezeichnet) sein, sondern ebenso wie das Prinzip der Energieabnahme bis zum kleinstmöglichen Wert allgemein noch auf beliebig komplexe Beispiele anzuwenden ist, so sollte auch das gleichzeitige und begleitende Verhalten der Ausbreitungsart selbst für jeden Fall klar formuliert werden können.

264. Wir wollen die betreffende, noch nicht eindeutig zu fassende Gesetzmässigkeit vorläufig als „Tendenz zum Zustandekommen einfacher Gestaltung" oder auch „zur Prägnanz der Gestalt" bezeichnen und diesen Worten mit Bewußtsein eine Unbestimmtheit lassen, welche wohl geeignet ist, uns stets an die ungelöste theoretisch-physikalische Aufgabe zu erinnern. Es hat wohl einen Wert, wenigstens diese zu kennen.

Die eben angegebenen Bezeichnungen sind von Wertheimer eingeführt, aber nicht zur Beschreibung des Verhaltens anorganisch-physikalischer, sondern phänomenaler und also auch physiologischer Geschehensstrukturen. Indessen dürfen die Ausdrücke auch auf physikalisches Gebiet übernommen werden; denn die Tendenz und Ausbildungsrichtung, welche in der Psychologie Wertheimer als allgemein erkannte und mit jenen Namen belegte, ist ganz offenbar eben diejenige, von welcher bisher die Rede war. Wir sind nicht in der Lage, das Zustandekommen der betreffenden physiologischen und phänomenalen Erscheinungen im einzelnen abzuleiten, aber die Geschehensrichtung, welche sich in ihnen äußert, zeigt noch einmal deutlich genug, daß es sich um Gestalten von demselben Grundcharakter wie in der Physik handelt: Unter den verschiedensten Umständen, welchen nur eine gewisse Schwäche der bedingenden Reizfaktoren gemeinsam ist, tendieren phänomenale Raumgestalten

dazu, in besonders einfache und prägnante Strukturen überzugehen, und sie so vor beliebigen unregelmäßigen Gebilden auszuzeichnen. Die Tendenz wird, wie in der Physik, an Extrembeispielen am besten zu erkennen sein, für welche der Sinn des „Einfach", „Prägnant", „Regelmäßig" nicht unklar bleiben kann.

265. Wertheimer brachte auf den Streifen eines Stroboskopes zwei oder mehrere Zeichnungen an, beobachtete die Gestalten, welche bei Veränderung der Geschwindigkeit nacheinander auftraten, und machte die Erfahrung, daß merkwürdigerweise „nicht etwa durchgehend die verschiedenen geometrischen Möglichkeiten sich sukzessiv entwickeln, sondern vorzüglich einfache Konfigurationen, die oft ziemlich abrupt, plötzlich ineinander übergehen" [1]).

Werden zwei (nicht zu benachbarte) Hautstellen kurz nacheinander berührt, so entsteht (wie im entsprechenden optischen Fall) phänomenal der Eindruck einer Bewegung von der ersten zur zweiten Stelle. In einer Reihe ungewöhnlich schöner und ergebnisreicher Versuche über diese Grunderscheinung ließ Benussi [2]) solche Reizfolgen durch einige Zeit hindurch periodisch wiederkehren, so daß also auf Reizung der zweiten wieder Berührung der ersten Hautstelle, auf die erste phänomenale Bewegung (unter günstigen Umständen) eine zweite Rückwärtsbewegung folgte usw. Damit stellte Benussi die Bedingungen für ein periodisch-stationäres Geschehen her und untersuchte unter anderem, welchen Einfluß die Veränderung der beiden Zwischenzeiten 1 bis 2 und 2 bis 1 in ihrem Verhältnis zueinander ausübte. Der Charakter der beobachteten Bewegung, vor allem auch ihre Geschwindigkeit, pflegt sonst von den zeitlichen Bedingungen stark beeinflußt zu werden. Es zeigte sich, daß bei längerer Dauer des Versuches die objektiven Zeitverhältnisse irrelevant wurden, indem sich eine ununterbrochene und gleichmäßige Hin- und Herbewegung ohne Rhythmus und ohne Geschwindigkeitsunterschied beider selbst noch bei dem Zeitverhältnis 1 zu 7 ausbildete. Das periodisch-stationäre Geschehen wird so ebenmäßig, wie es kann.

In der gleichen Untersuchung stellte sich heraus, daß — ebenfalls bei längerer Andauer des Experiments — der gerade Weg, welchen die Bewegung zwischen beiden Stellen zunächst einschlägt, allmählich und offenbar durch den Vorgang selbst ungangbar gemacht wird [3]). Dann weicht die Bewegung seitlich aus, und zwar symmetrisch zu beiden Seiten, so daß der Weg 1 bis 2 und der Weg 2 bis 1 „eine kleine Schleife beschreiben". Aber auch diese

[1]) Experimentelle Studien über das Sehen von Bewegung, S. 91.

[2]) Arch. f. d. ges. Psychol. **36**, 125, 1916.

[3]) Es hält schwer, bei dieser auffallenden Erscheinung nicht an elektrolytische Polarisation zu denken (Kö.).

Schleife hält sich nicht, sondern die Bewegung nimmt am Ende Kreisform an[1]). Selbst bei so starken Variationen der Zwischenzeiten 1 bis 2 und 2 bis 1, wie sie im zuerst angeführten Experiment vorgenommen wurden, wird jetzt ein „Maximum der Ausgleichung" erreicht: „Sobald ... der Eindruck des hin und her verschwunden und die Richtung der Bewegung somit eine konstante ist, erreicht das ganze Phänomen eine früher nicht vorhanden gewesene Abgeschlossenheit: die Erscheinung wird zu einer bewegungsungegliederten, maximal einheitlichen, und die einzelnen Berührungen sind dieser Erscheinung vollständig untergeordnet"[2]).

266. Auf dem Göttinger Kongreß für experimentelle Psychologie (1914) teilte Gelb[3]) überraschende Beobachtungen darüber mit, daß drei im Dunkeln sukzessiv in gerader Linie aufleuchtende Punkte selbst bei einem objektiven Verhältnis der beiden zwischenliegenden Abstände von 10 zu 30 cm die Tendenz zeigten, als phänomenal symmetrische Gruppe gesehen zu werden. Besonders stark erwies sich dieser Druck nach Gestaltsymmetrie dann, wenn die Zeiten 1 bis 2 und 2 bis 3 gleich waren oder als gleich erschienen.

Benussi, der dem gleichen Kongreß einen kurzen Vorbericht über seine bereits erwähnten Entdeckungen erstattete, wies dabei auf eine Tendenz der untersuchten kinematohaptischen Vorgänge zu einfachen, uns geläufigen Formen hin[4]). In der Diskussion zu diesen Mitteilungen stellte sich dann die allgemeinere Geltung der Regel zum ersten Male deutlich heraus. Bourdon wurde angeführt, nach dessen Beobachtung zwar drei, vier, fünf oder sechs Punkte, in regelmäßiger Lage um ein Zentrum geordnet, optisch-phänomenal ein Drei-, Vier-, Fünf- oder Sechseck ergaben, acht Punkte aber zwangsmäßig nicht mehr ein Achteck, sondern einen Kreis[5]).

Goldschmidt teilte daraufhin mit, daß im Dunkelzimmer lichtschwach und kurz exponierte Flächenfiguren, die objektiv dreieckig, rechteckig, quadratisch oder sonstwie polygonal, elliptisch

---

[1]) A. a. O., S. 88 und vielfach sonst.

[2]) A. a. O., S. 126.

[3]) Ber. ü. d. VI. Kongreß f. exper. Psychol., herausg. von Schumann, S. 36 ff.

[4]) So nach einer Diskussionsäußerung des Herrn Rupp. Das Epitheton „uns geläufig" wäre sehr geeignet, von vornherein eine recht unfruchtbare theoretische Auffassung zu begünstigen.

[5]) Bemerkung von Rupp a. a. O., S. 148 f. — Dem Nichtpsychologen darf hier nicht entgehen, daß bereits die Entstehung eines phänomenalen Vielecks (als geschlossener Figur), wo nur isolierte Reizpunkte auf sonst homogener Fläche gegeben sind, eine Erscheinung ganz analog der oben (168) beschriebenen darstellt.

oder kreisförmig waren, „als (unscharf umgrenzte) kreisförmige Lichtnebel aufgefaßt wurden, gleichviel, welche Gestalt und Größe die Lichtreize ... gehabt hatten“. Wenn die Dauer oder Intensität oder endlich beide Eigenschaften der Expositionen allmählich erhöht wurden, dann zeigten die Figuren eine „Tendenz, so zur Auffassung zu gelangen, als seien alle oder wenigstens einige Ecken der objektiv dargebotenen Reizfläche ... mehr oder minder stark zusammengeschrumpft, als sei überhaupt die Figur einem Kreise oder einer Ellipse möglichst ähnlich geworden“. Parallelversuche über taktile Gestaltwahrnehmung bei kurzer Reizdauer hatten ähnliche Ergebnisse, insbesondere wiederholte sich hierbei die Tendenz zum Kreise[1]).

Statt die Reizung auf kürzeste Zeit und schwächste Intensität zu beschränken, scheint man solche Beobachtungen auch an Nachbildern vornehmen zu können. Denn im didaktischen Teile der Goetheschen Farbenlehre heißt es von ihnen (§ 25 und 26): „Diese Bilder verschwinden nach und nach, und zwar indem sie sowohl an Deutlichkeit als an Größe verlieren. Sie nehmen von der Peripherie herein ab, und man glaubt bemerkt zu haben, daß bei viereckten Bildern sich nach und nach die Ecken abstumpfen und zuletzt ein immer kleineres rundes Bild vorschwebt“.

267. Im Verlauf eben dieser Diskussion machte Wertheimer bekannt, daß nach seinen Untersuchungen ein ganz allgemeines Gestaltgesetz vorliegt[2]). Ich glaube mit Recht zu vermuten, daß die von Wertheimer gemeinte Erweiterung über Einzelbeobachtungen wie die angeführten hinaus zweifacher Art ist:

I. Unter allen Umständen, durchaus nicht nur auf optischem und taktilem, nicht nur auf räumlichem und auch nicht allein auf Wahrnehmungsgebiet, zeigt sich die gleiche Ausbildungstendenz phänomenaler Strukturen.

II. Das Gesetz ist in derselben, noch nicht eindeutig zu formulierenden Weise, wie es oben geschah, auch in der Psychologie über den Bereich einfachster Symmetrien hinaus auf Fälle komplexerer Bedingungen zu übertragen; auch für solche fallen phänomenale Gestalten nach Möglichkeit „einfach“ und „regelmäßig“ aus.

Daran kann man noch eine weitere These schließen:

III. Wenn gestaltetes Geschehen eines Sinnesgebiets die Möglichkeit hat, durch Einwirkung auf (vorher im Gleichgewicht befindliche) motorische Organe seine eigenen Bedingungen abzuändern, so ist dieser Verschiebung und der damit gegebenen Selbstumbildung der Struktur die Richtung auf zunehmende Einfachheit

---

[1]) A. a. O., S. 149 ff.
[2]) A. a. O., S. 149.

immer dann vorgezeichnet, wenn der Energieumsatz in jenen Organen durchaus von dem gestalteten Geschehen bestimmt wird. So weist z. B. das „Gesetz des größten Horopters", bei weitem die Regel allgemeinster Gültigkeit im Gebiete der Augenbewegungen, auf unmittelbare Abhängigkeit der Bulbusinnervationen von den Strukturen des optischen Systems hin, welche sich, wie alle Gestalten auch der anorganischen Natur, auf größtmögliche Ausgeglichenheit und Einfachheit hin verändern, ohne dazu für jeden Fall besonderer Mechanismen zu bedürfen (vgl. oben 191).

Die Anwendung auf allgemein-biologische und entwicklungsgeschichtliche Fragen liegt außerhalb des Planes dieser Schrift.

Date Due

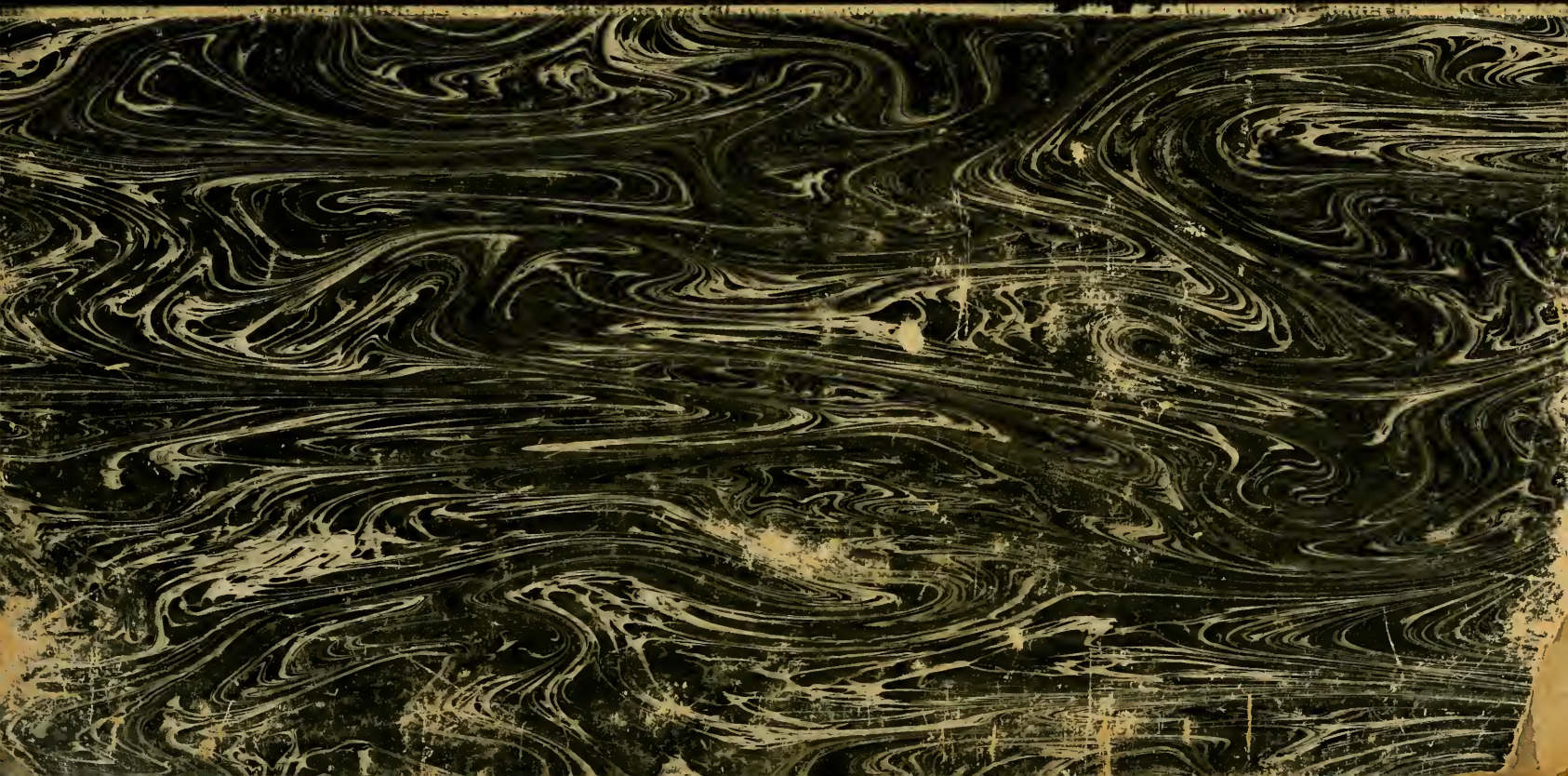
2 OCT 17			

L. B CAT. NO. 1137

PSYCHOLOGY

Q175.K6 SCIII
3 5002 00055 1908
Kohler, Wolfgang
Die physischen Gestalten in Ruhe und im

Köhler
AUTHOR
Q
175
K6
112443
Die physischen gestalten in
TITLE
ruhe und im stationären zus
DATE DUE
BORROWER'S NAME
4/10/25
2 AUG 16
7/15/33

PSYCHOL
Q
175
K6
112443

G E STECHERT & Co
(ALFRED HAFNER)